I PROGRESSI RECENTI

DELLA

FISICA

TEORICA, SPERIMENTALE ED APPLICATA

CONFERENZE

tenute nella Regia Università di Genova

da

M. ABRAHAM, A. BATTELLI, A. GARBASSO, L. MAGRI, L. PUCCIANTI
L. ROLLA, P. ROVETTI e A. SCRIBANTI

RACCOLTE E PUBBLICATE

per cura di

ANTONIO GARBASSO

MILANO-ROMA-NAPOLI
SOCIETÀ EDITRICE DANTE ALIGHIERI
DI
Albrighi, Segati & C.

1911

I PROGRESSI RECENTI

DELLA

FISICA

TEORICA, SPERIMENTALE ED APPLICATA

CONFERENZE

tenute nella Regia Università di Genova

da

M. ABRAHAM, A. BATTELLI, A. GARBASSO, L. MAGRI, L. PUCCIANTI
L. ROLLA, P. ROVETTI e A. SCRIBANTI

RACCOLTE E PUBBLICATE

per cura di

ANTONIO GARBASSO

MILANO-ROMA-NAPOLI
SOCIETÀ EDITRICE DANTE ALIGHIERI
DI
Albrighi, Segati & C.

1911

Nell'ottobre del 1909, per iniziativa dei Professori D. Omodei e M. Razeto e dello scrivente, si tenne nella R. Università di Genova un corso di Conferenze su La Fisica e le sue applicazioni.

Pubblicando il programma di tale corso, noi dicevamo allora:
« La specializzazione delle ricerche scientifiche se ha avuto risul-
« tati felici per ciò che riguarda lo studio profondo e definitivo di
« certi problemi particolari, ha però fatto quasi stranieri gli uni
« agli altri i cultori delle varie discipline ».

« La cosa non è senza inconvenienti gravi, e l'eccesso del male
« attesta ormai la opportunità del rimedio. Tutti sentiamo infatti
« il bisogno di informarci almeno di quello che si fa nei campi
« vicini al nostro piccolo campo ».

« Vedute nuove della scienza pura e nuove conquiste della
« tecnica attirano di volta in volta la nostra curiosità, e si rim-
« piange spesso che manchino quasi completamente i mezzi di
« informazione rapida e sicura ».

Il concorso del pubblico e l'esito delle conferenze ci persuasero che l'iniziativa rispondeva appunto ad un bisogno, anche più diffuso e più sentito che non avessimo pensato.

Erano venuti in nostro aiuto i colleghi M. Abraham, A. Battelli, L. Magri, L. Puccianti, L. Rolla e A. Scribanti, e il Tenente Ing. P. Rovetti, designato da S. E. il Generale Spingardi, Ministro della Guerra, fra gli ufficiali della Brigata Specialisti.

Molti degli uditori espressero allora a noi e ai conferenzieri il desiderio che quelle lezioni venissero raccolte insieme e pubblicate; il volume che esce alla luce risponde a quel voto.

La pubblicazione ne fu ritardata per ciò che alcuni dei colleghi non avevano redatto, quando le esposero a viva voce, le loro conferenze in forma definitiva. E fu ritardata anche da una circostanza particolarmente dolorosa.

Due giorni dopo di aver lasciato Genova, il Tenente Rovetti, durante il raid *Roma–Napoli–Roma del dirigibile* 1-bis, *cadeva vittima del suo coraggio e della sua baldanza giovanile. Nessuno ha sentito la tragicità di questo destino crudele come noi, che lo avevamo veduto poco prima, pieno di vita e pieno d'entusiasmo.*

Il tenente Rovetti aveva lasciato delle sue conferenze un riassunto, che intendeva senza dubbio completare più tardi. Ci è parso che tale riassunto non dovesse mancare, ad ogni modo, al volume nel quale è raccolto il frutto della fatica comune.

Il Cav. Gaetano Rovetti, padre dell'estinto, volle esaudire la nostra preghiera, e gliene esprimo, per me e per i miei collaboratori, la più viva riconoscenza.

Il Colonnello Moris, alla sua volta, ebbe la cura pietosa di far rivedere il testo da uno dei suoi ufficiali. Io l'ho pubblicato religiosamente com'era, anche dove appariva evidente qualche ripetizione (1) e qualche discontinuità; ho soppresso solamente l'accenno ad alcune figure, che fu impossibile ricostruire (2).

Ringrazio i colleghi Abraham, Battelli, Magri, Puccianti, Rolla e Scribanti della loro preziosa collaborazione, e il Senatore Maragliano, Rettore dell' Università di Genova, del benevolo appoggio, col quale volle sostenere la nostra iniziativa.

Genova, febbraio 1911.

A. Garbasso.

---

(1) Come nei paragrafi 14 e 26.

(2) Le figure 45, 48, 49, 50, 52, 53 e 54 sono tolte dall'opera di L. de Saint Fégor, Le royaume de l'air, *col gentile consenso dell'Editore Félix Juven di Parigi.*

ANGELO BATTELLI

ELETTRICITÀ E MATERIA

§ 1. — *Introduzione.* — Tocca a me l'onore di iniziare questo corso di conferenze, che con intento alto e moderno il prof. Garbasso ha istituito per gl'insegnanti delle Scuole Medie d'Italia.

M'è sembrato che nessun tema più interessante io potessi scegliere, entro i limiti delle mie conoscenze, che quello di esporre per sommi capi i fatti e le teorie più salienti che ci hanno condotto a formulare una ipotesi oggi di larga applicazione nel campo della Fisica e delle scienze affini: l'ipotesi della costituzione elettrica della materia.

§ 2. — *Ioni delle fiamme e dei metalli roventi.* — In molte circostanze le particelle che costituiscono i corpi, appariscono cariche di elettricità, come ad esempio nei fatti notissimi dell'elettrolisi.

Anche nelle fiamme si liberano sempre delle particelle cariche di elettricità dei due segni, come possiamo accertarci ponendo davanti a un disco metallico isolato (*S*, fig. 1), in comunicazione con un elettroscopio *E*, una candela accesa *C* e accostando a pochi centimetri dalla fiamma della candela una bacchetta di ebanite o di vetro elettrizzato *A*. Se dopo qualche istante che la bacchetta e la fiamma sono state in presenza del disco noi le togliamo, troviamo che l'elettroscopio si è caricato positivamente se la bacchetta era di vetro, negativamente se la bacchetta era di ebanite.

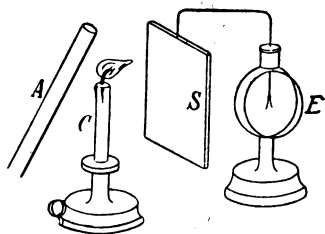



Fig. 1.

Dunque nella fiamma della candela esistevano delle particelle cariche dei due segni e quelle respinte dal vetro o dall'ebanite hanno dato luogo alla carica che si è raccolta sul disco comunicante con l'elettroscopio.

Anche i metalli roventi attraversati da una corrente emettono delle cariche elettriche, e in più abbondanza di uno piuttosto che dell'altro segno a seconda della temperatura. Carichiamo infatti negativamente l'elettroscopio munito di disco che abbiamo ora adoperato, e collochiamo davanti ad esso alla distanza di pochi millimetri un'ansa di platino che arroventeremo con la corrente fino al calor rosso oscuro. Vedremo l'elettroscopio scaricarsi rapidamente indicandoci che dal platino rovente sono sfuggite delle cariche positive. Carichiamo infatti posivitivamente l'elettroscopio e ripetiamo l'esperienza: la dispersione non avviene. Se però accresciamo la corrente nel filo di platino in modo che questo si arroventi fino a diventar bianco, noi vedremo rapidamente disperdersi la carica del disco. Ciò che mostra all'evidenza come ad una temperatura così elevata si liberino dal metallo delle cariche negative.

§ 3. — *Pile di concentrazione.* — Potrebbe venire il dubbio che le cariche elettriche che si osservano nell' elettrolisi fossero prodotte dalla pila che fornisce la corrente, ma possiamo subito persuaderci che nelle soluzioni acquose dei sali minerali tali cariche esistono indipendentemente da qualsiasi azione esterna.

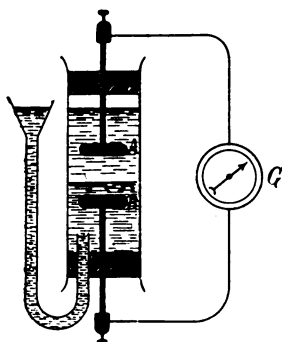



Fig. 2.

In un tubo di vetro (fig. 2) poniamo due dischetti di rame *A* e *B* in comunicazione con un galvanometro *G*, versiamo nella parte inferiore del tubo una soluzione concentrata di carbonato di rame ammoniacale e in questa immergiamo il disco inferiore, *B*. Al di sopra di questa soluzione versiamo con cautela dell'acqua ed immergiamo in questa il secondo disco *A*. Dopo un po' di tempo il carbonato di rame ammoniacale comincia a diffondersi nell'acqua sovrastante e vediamo che il galvanometro dà segno di una corrente elettrica di senso tale che è positivo il disco che si trova nella soluzione più concentrata. Esistono dunque nella soluzione delle cariche elettriche libere dei due segni, ma le cariche elettriche positive non hanno la stessa mobilità di quelle negative: l'esperienza precedente ha infatti dimostrato che quest'ultime si diffondono nell'acqua più

rapidamente delle positive e per questo si ha la corrente indicata dal galvanometro.

Nell'atto della soluzione dunque si formano le cariche elettriche dei due segni, e, come mostrano le leggi dell'elettrolisi, la carica positiva accompagna sempre il metallo, la negativa l'altra parte della molecola.

Inoltre la presenza di queste cariche elettriche separate nelle particelle dei vari corpi influisce notevolmente sulle loro proprietà. Così ad esempio, l'acido solforico puro concentrato si lascia attraversare dalla corrente con difficoltà: ciò mostra che poche delle sue molecole sono scisse in due parti cariche oppostamente (ioni), e in questo stato l'acido non attacca nè il ferro, nè lo zinco. Ma basta diluirlo con un po' di acqua perchè diventi conduttore (cioè perchè molte delle sue molecole si scindano in ioni) e perchè acquisti subito la facoltà di reagire violentemente col ferro e con lo zinco.

Anche l'azione chimica è dunque dovuta alle particelle cariche in cui si scinde la molecola neutra dell'acido solforico diluito.

Dal fatto che nelle combinazioni chimiche una data quantità di sostanza semplice si può combinare con un'altra determinata quantità di un'altra sostanza semplice, od anche con una quantità doppia o tripla ecc., non mai con quantità frazionarie, si deduce che la materia deve avere una struttura granulare (atomica).

Le leggi dell'elettrolisi mostrano che gli atomi degli elementi monovalenti trasportano tutti, qualunque sia il loro peso atomico, la stessa carica elettrica, tutti gli atomi bivalenti ne trasportano una doppia, ecc.; dunque anche l'elettricità deve avere struttura atomica. La carica più piccola che si incontra è quella portata da un atomo monovalente, noi la chiameremo un *Elettrone*.

§ 4. — *Ombre elettriche*. — Un corpo conduttore elettrizzato immerso in un gas conserva lungamente la sua carica: nell'aria e negli altri gas le molecole non sono dunque scisse nei loro ioni come avviene per le molecole di molti sali in soluzione, ma in certe circostanze anche nell'aria e negli altri gas in genere questi ioni si possono formare.

Così ad es.: le punte fortemente cariche hanno facoltà di scindere le molecole dell'aria in particelle elettrizzate. Ne viene come conseguenza che le particelle cariche di segno contrario a quello

della punta sono attratte da essa; le altre sono respinte e proiettate lontano da essa. Di ciò possiamo assicurarci con la seguente esperienza.

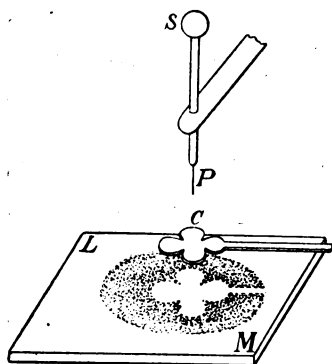



Fig. 3.

Al disotto di una punta isolata (P, fig. 3) mettiamo una lastra di ebanite L M, e fra questa e quella poniamo un oggetto, per esempio una croce (G); carichiamo la punta positivamente, le particelle respinte da essa vanno a colpire la lastra di ebanite e la caricano positivamente. Se poi mediante un soffietto spandiamo un miscuglio di minio e zolfo sulla lastra vediamo che la polvere di minio, che nell'uscire dal soffietto si è elettrizzata positivamente, ricopre la lastra nella parte protetta dalla croce mentre tutto il resto della lastra si ricopre di zolfo.

§ 5. — *Scariche nei gas rarefatti.* — Così è dimostrato che nei liquidi e nei gas possiamo avere delle particelle elettrizzate che si muovono liberamente con una certa velocità.

In questa migrazione si urteranno spesso fra loro, producendo delle scissioni di molecole complete o ricombinandosi per formare delle molecole intere. Ma la frequenza di questi urti impedirà loro di prendere velocità considerevoli, anche quando forze esterne ottenute, per esempio, per mezzo di corpi elettrizzati le sollecitano a muoversi con una certa regolarità. L'unico modo di ottenere grandi velocità in queste particelle sarà di diminuire il numero degli urti diradando la materia. Operando in questo modo dobbiamo aspettarci di ottenere per quelle particelle velocità tali da provocare, nell'urto, notevoli effetti luminosi o calorifici.

La nostra aspettativa è pienamente confermata dall'esperienza.

Se in un tubo munito di elettrodi operiamo una rarefazione per mezzo di una pompa pneumatica e colleghiamo gli elettrodi ai poli di un rocchetto di Ruhmkorff, si vede una luminosità invadere tutto il tubo dandoci così la prova degli urti violenti che le particelle elettrizzate hanno fra di loro incontrandosi nella corsa veloce verso l'elettrodo che le attira.

A un certo punto il fenomeno diventa particolarmente brillante.

Tutta quella colonna luminosa appare come spezzata in tanti strati; è un effetto spiegabile e prevedibile. Sotto l'azione attrattiva dei due elettrodi gli atomi carichi di elettricità positiva si precipitano verso il polo negativo, gli altri vanno in senso inverso. Quando hanno acquistato una certa velocità si incontrano violentemente o incontrano delle molecole neutre, e dall'urto si sviluppa la luminosità: ma dopo questo primo urto quelle particelle si trovano rallentate nella loro corsa e non hanno perciò tanta energia da produrre degli effetti visibili: ma l'azione del campo che è sempre presente imprime loro nuova velocità, donde nuove collisioni violente e successivo rallentamento. Perciò tutti questi strati luminosi ci indicano il luogo in cui gli urti sono energici, e gli strati oscuri, che si alternano con gli altri, ci indicano il posto in cui le particelle riacquistano la velocità che hanno perduto nell'urto.

§ 6. — *Raggi catodici.* — Se spingiamo la rarefazione ad un grado più alto, renderemo meno frequenti gli urti fra le particelle elettrizzate che acquisteranno perciò una velocità più grande.

Così in un tubo estremamente vuotato gli urti divengono tanto rari che nessuna luminosità è visibile nel suo interno; ma una viva fluorescenza verde si desta allora sulla parete opposta all'elettrodo negativo.

Evidentemente le particelle respinte da quest'ultimo arrivano indisturbate fino alla parete opposta del tubo, sulla quale battendo con grande velocità destano la fluorescenza caratteristica.

Questo è il ben noto fenomeno dei raggi catodici.

Che realmente esista una proiezione di queste particelle dirette dal catodo contro la parete opposta del tubo si può verificare come ognuno sa ponendo sul loro percorso nell'interno del tubo un ostacolo, ed osservando la sua ombra proiettata sul fondo fluorescente; oppure si può interporre sul cammino dei raggi catodici un piccolo mulinello di mica che quando è colpito da questi ultimi si mette a girare.

Esperimento – quest' ultimo – che dimostra pure la grande velocità di cui sono dotate quelle particelle.

È chiaro che il semplice fatto che queste particelle sono respinte dall'elettrodo negativo fa presumere che esse siano caricate negativamente. L'esperienza diretta ci conferma senz'altro che i raggi

catodici sono un corteo di particelle negative che si muovono con una grande velocità: serve ad eseguirla un tubo avente nell'interno un pozzo di Faraday (B, fig. 4) munito di una apertura collocata in modo da permettere l'entrata dei raggi catodici, e dentro questo un'altro cilindro di Faraday (A) in comunicazione con un elettroscopio, ed anche esso con l'apertura disposta in modo da raccogliere questi raggi catodici.

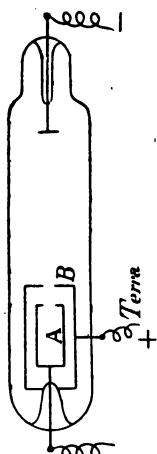



Fig. 4.

È facile prevedere che facendo passare queste particelle tra le due armature di un piccolo condensatore collocato in un tubo di scarica (fig. 5), esse verranno attratte verso l'armatura positiva e il fascio catodico sarà deviato. L'osservazione conferma pienamente questa previsione e la deviazione si rende sensibile con lo spostamento della macchia fluorescente sulla parete del tubo. Ora è evidente che questa deviazione sarà tanto più forte quanto più grande sarà l'elettrizzazione delle particelle e quanto minore sarà la velocità con cui passano nel campo del condensatore.

Fig. 5.

Ma questo fascio di particelle elettrizzate che costituiscono i raggi catodici in fondo non è che una corrente elettrica; e come una corrente elettrica è deviata da un magnete, pure il fascio catodico sarà deviato dalla presenza di una calamita (fig. 6).

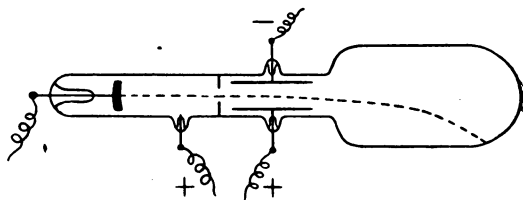
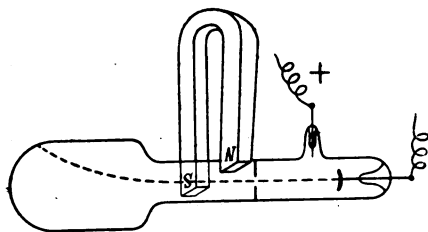



Fig. 6.

E anche quì la deviazione, che si potrà misurare direttamente, dipenderà oltre che dalla velocità delle particelle dalla loro massa e dalla loro carica.

La determinazione di questi elementi quando siano dati gli spostamenti del fascio nelle due esperienze precedenti è un problema molto semplice di balistica; la risoluzione di questo problema ci dice

che la velocità delle particelle catodiche è circa 60000 Km. al minuto secondo.

In quanto alla loro massa, noi non la possiamo calcolare, ma possiamo avere il rapporto tra la carica e la massa di ciascuna particella elettrizzata. A questo punto bisogna ricordare che un tale rapporto si può determinare anche per gli ioni presenti nelle soluzioni e che fra i valori così ottenuti è molto interessante fare un confronto.

Orbene, si trova che nei corpuscoli catodici questo rapporto è indipendente dalla natura del gas, contrariamente a quanto avviene negli ioni delle soluzioni: esso inoltre è duemila volte maggiore del corrispondente rapporto nell'atomo di idrogeno.

Se i corpuscoli dei raggi catodici sono atomi materiali hanno con sè una carica almeno 2000 volte più grande di quella portata da ogni atomo di idrogeno nei fenomeni elettrolitici. Per sapere se è così bisogna misurare proprio la carica portata da ciascuna di quelle particelle.

La carica complessiva di un certo numero di corpuscoli catodici si può misurare facilmente, come abbiamo visto, coi mezzi soliti, e allora la carica individuale di ognuno di essi si otterrebbe molto facilmente quando se ne conoscesse il numero.

§ 7. — *Condensazione del vapor d'acqua sugli ioni.* — Furono il Wilson e il Thomson i primi a fare con un arditissimo procedimento questa numerazione, giovandosi a tal uopo della condensazione del vapor d' acqua sugli ioni.

Alcune esperienze chiariranno quest' ultimo fatto accennato.

Si unisca (fig. 7) ad un palloncino contenente acqua in ebullizione un tubo di vetro di una settantina di centimetri di lunghezza che termini in un orifizio di pochi mm. di diametro; da esso sfuggirà un getto di vapore uniforme e trasparente se la fiamma che si trova sotto il palloncino arde con costante efficacia. Si avvicini ora al getto una punta in comunicazione con uno dei poli di una macchina elettrica in attività;

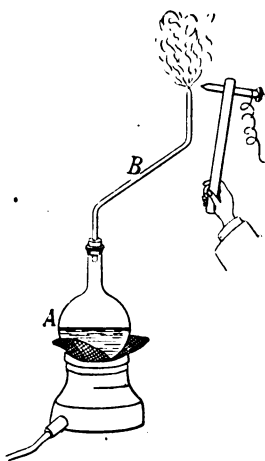



Fig. 7.

dalla punta sfuggono gli ioni numerosi e il getto si intorbida per l'istantanea condensazione del vapore sugli ioni. Se proiettiamo su di uno schermo l'ombra del getto servendoci come sorgente luminosa di un forellino illuminato molto intensamente, quando la punta è scarica vedremo disegnarsi molto tenue e trasparente l'ombra di quello, quando la punta è carica e sfuggono gli ioni vedremo l'ombra oscura e spesso colorita per diffrazione.

Se ora in un ambiente, che nelle condizioni ordinarie di temperatura non sia eccessivamente saturo di vapore, facciamo pervenire degli ioni gassosi, su di essi in queste condizioni il vapore non si condensa, ma si condensa subito appena un leggero raffreddamento aumenti lo stato igrometrico relativo dell'ambiente. Tale raffreddamento può esser prodotto da una rapida espansione del gas. Così se in una grossa campana da macchina pneumatica facciamo ardere per qualche istante la fiamma di un cerino e quindi produciamo, facendo agire la macchina, una rapida rarefazione, vediamo formarsi una densa nebbia che sparisce appena si faccia rientrar l'aria. Se mandiamo via l'aria contenuta nella campana e ripetiamo l'esperienza senza la fiamma del cerino, la nebbia non si forma o si forma in quantità minima. Sono dunque necessari gli ioni emessi dalla fiamma per la sua condensazione.

§ 8. — *Carica degli ioni gassosi.* — Ciò premesso, ecco come ha proceduto il Thomson. Suppongasi, come è naturale, che ognuna delle goccioline che compongono la nebbia abbia per nucleo un ione solo, basterà allora misurare la carica totale portata da una determinata massa di nebbia condensata sugli ioni e contare il numero delle goccioline che la compongono per sapere quale è il numero degli ioni e la carica di ciascuno di essi.

Per assicurarsi che la condensazione avvenisse su gli ioni e non sul pulviscolo, il Thomson in un ambiente saturo di vapor d'acqua operava un raffreddamento repentino per mezzo di una rapida espansione del gas. La nebbia così ottenuta si era condensata sul pulviscolo sparso nell'aria che, col lasciare depositare la nebbia, poteva essere eliminato. In tal modo si poteva realizzare un ambiente privo di pulviscolo tanto da non aver la formazione di nebbia per successive espansioni del gas. Allora il Thomson faceva pervenire nel gas degli ioni e operava nuovamente l'espansione rapida e quindi il raffred-

damento. La nebbia ottenuta era certamente condensata tutta sugli ioni.

L'apparecchio che ha servito al Thomson è indicato schematicamente nella fig. 8.

È costituito da un cilindro di vetro A chiuso superiormente da una lastra metallica M e inferiormente da uno stantuffo che permette di operare l'espansione. La saturazione dell'ambiente è fatta da uno strato d'acqua M_1. Così M e M_1 costituiscono le due armature di un condensatore: fra di esse si introducono degli ioni gassosi [1] attorno ai quali il vapor d'acqua si condensa appena per mezzo dell'espansione si realizzi un conveniente raffreddamento.

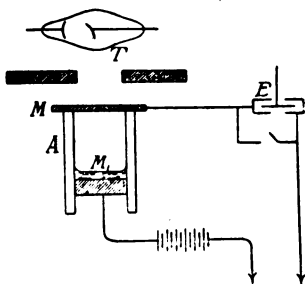



Fig. 8.

Se dopo ciò si porta l'armatura M_1 a un determinato potenziale mettendola in comunicazione con un polo di una pila, e se si isola l'armatura M dopo averla messa a terra, degli ioni presenti nella camera quelli di un dato segno si porteranno sopra di essa caricandola, quelli del segno opposto saranno attratti da M_1.

E se mediante la disposizione della fig. 8 mettiamo M in comunicazione con un elettrometro a quadranti E si potrà misurare la carica totale depositata su M dai nuclei nell'unità di tempo.

Essa è data dal prodotto CP della capacità elettrostatica del sistema per la diminuzione del suo potenziale nell'unità di tempo.

Ora, sia E l'intensità del campo elettrico ossia il rapporto fra la differenza di potenziale stabilita fra M e M_1 e la loro distanza, sia N il numero dei ioni compresi in un cm^3, v la velocità dei ioni in in un campo unitario, ossia la loro *mobilità*, q la carica portata da ciascuno di essi, S la superficie di M. La carica ceduta ad M dai nuclei nell'unità di tempo sarà data da $N\,v\,E\,q\,S$ talchè si avrà

$$N\,v\,E\,q\,S = CP \qquad (1)$$

In questa equazione tutto è accessibile all'esperienza fuorchè q ed N.

La carica q portata da ciascun ione sarà calcolabile quando sia

(¹) Ciò si può ottenere facendo agire il tubo T.

noto il numero delle goccioline che si formano sopra ciascuno degli ioni contenuti nell'unità di volume del gas per effetto di una espansione. Per calcolare questo numero notiamo che se t è la minima temperatura dell'aria nell'atto dell'espansione e t' è la temperatura dell'aria stessa dopo la formazione della nebbia, indicando con M la massa d'aria compresa in un cm^3, con L il calore di evaporazione dell'acqua e con c il calore specifico dell'aria a volume costante si avrà che la quantità K di vapore condensato per centimetro cubo è dato dall'equazione

$$L\ K = c\ M\ (t' - t)$$

Conosciuta la massa K, il numero N di goccioline si avrebbe quando si conoscesse la massa di ogni goccia.

Ma queste goccie cadono nell'aria con una velocità tanto più grande quanto più grande è la loro massa, e se si conosce qual'è la relazione che lega questi due elementi si può ricavare l'uno in funzione dell'altro. Si tratta dunque di risolvere un problema di dinamica e precisamente di determinare il moto di una sfera in seno ad un fluido che opponga al movimento una forza d'attrito.

Questo problema è stato risolto da lungo tempo da Stokes, il quale ha trovato che la velocità di una sfera che cade in seno all'aria è costante e ha per espressione

$$V = \frac{2}{9} \frac{g\, r^2 \rho}{\eta},$$

dove g è l'accelerazione della gravità
r è il raggio della sfera
ρ l'eccesso della densità della sfera su quella del mezzo
η l'attrito interno del mezzo.

La velocità delle goccioline di nebbia si può misurare osservando la rapidità con la quale lo strato di nebbia si abbassa sotto l'azione della gravità: quindi la formula precedente dà modo di trovare il raggio delle singole goccie. Ma allora tra la quantità K di acqua contenuta in un cm^3 di nebbia, il raggio r di ogni goccia e il numero N delle goccie in un cm^3 esiste la relazione evidente

$$K = 4/3\ \pi\ r^3\ N,$$

dalla quale si può ricavare N e così calcolare q ossia la carica portata da un ione.

Dalle misure è risultato che la carica portata dai ioni sì positivi che negativi è sempre la stessa ed è circa

$$q = 1{,}1 \times 10^{-20} \text{ unità elettromagnetiche assolute.}$$

Questo risultato stabilisce già che la carica portata da un ione è dell'ordine di quella portata dall'atomo di idrogeno.

Il fatto che essa risulta un po' inferiore al valore trovato nei fenomeni di elettrolisi è senza dubbio imputabile agli errori di osservazione che in una misura tanto difficile possono essere rilevanti. Basta riflettere che nella caduta delle goccioline queste evaporeranno in parte, e il loro diametro diminuirà continuamente. Quindi il calcolo del numero di queste goccioline riuscirà certamente superiore del vero e ciò ha in ultima analisi per effetto di dare per q un valore troppo piccolo.

Noi quindi ammetteremo che la carica di un ione gassoso sia quella portata dall'atomo di idrogeno, cioè sia di un elettrone.

Riterremo poi che il valore di un elettrone sia compreso tra 1×10^{-20} e 2×10^{-20} unità elettromagnetiche assolute.

§ 9. — *Elettrone come costituente della materia.* — I fatti precedenti ci dimostrano dunque che l'elettricità, come appariva dai fenomeni elettrolitici, ha veramente una struttura atomica.

Per tali fatti la nozione di *elettrone*, come la più piccola quantità di elettricità che si possa incontrare in natura, acquista un fondamento sperimentale.

Dal confronto poi tra la carica e la massa delle particelle catodiche e degli ioni nell'elettrolisi risulta che i corpuscoli catodici hanno una massa circa duemila volte più piccola di quella dell'atomo di idrogeno. Ma questi corpuscoli catodici derivano dagli atomi materiali, e qualunque sia il gas in cui avviene la scarica essi sono sempre uguali tra loro; siamo dunque condotti a ritenere che nella materia, qualunque sia la sua natura, esistano questi corpuscoli elettrizzati negativamente, tutti aventi la stessa massa e la stessa carica. *L'elettrone o corpuscolo negativo è dunque un costituente comune di tutte le specie chimiche.*

§ 10. — *Raggi Röntgen.* — È noto a tutti che dai corpi colpiti dai raggi catodici si propaga all'intorno una specie di radiazione che ha la proprietà di impressionare le lastre fotografiche, di destare

la fluorescenza di certe sostanze, di ionizzare intensamente i gas che attraversa, di passare con maggior o minor facilità attraverso a tutte le sostanze, di attraversare con facilità molti corpi opachi alla luce. Tali radiazioni come è noto non si rifrangono e non si riflettono regolarmente. Il loro grande potere penetrante le ha rese preziose per usi svariati. Non sono deviate da campi magnetici, nè da azioni elettrostatiche e sono verosimilmente dovute a movimenti propagantisi nell'etere in modo analogo alle radiazioni luminose.

§ 11. — *Sostanze radioattive.* — Poichè questi raggi di Röntgen vengono emessi dalla base del tubo, o dalle sostanze solide in esso contenute quando sono colpite dai raggi catodici e rese fluorescenti, sembrò necessario ai primi osservatori indagare se la fluorescenza fosse la causa produttrice dei raggi X; e come ognuno ricorda la scoperta delle sostanze radioattive fu appunto dovuta alle ricerche eseguite su quei minerali di uranio che si introducevano nei tubi Crookes per la bella fluorescenza che vi acquistavano. Non è il caso qui di trattenerci sulla storia di questa scoperta, nè sui metodi di separazione delle sostanze radioattive.

Basti ricordare che le sostanze radioattive primarie, quelle cioè, dalle quali, derivano tutte le altre, sono l'Uranio, il Torio, il Radio e l'Attinio, e che tutte queste sostanze si rivelano per mezzo di un irraggiamento intenso al quale sono dovute le loro più appariscenti e più notevoli proprietà.

Tali proprietà sono in miglior modo mostrate dai sali di radio che per la loro intensità di irraggiamento superano le altre sostanze. Il bromuro di radio puro scarica con grandissima rapidità qualunque elettroscopio, impressiona in breve tempo le lastre fotografiche, desta una viva fluorescenza nel platino cianuro di bario, nella willemite, nella kuntzite, nella blenda di Sidot, nel diamante, ecc. Alcune delle radiazioni emesse dal radio hanno un grandissimo potere penetrante, tanto che possiamo vedere scaricare l'elettroscopio in pochi secondi da parte di qualche milligrammo di radio racchiuso entro una scatola di ottone.

Il bromuro e cloruro di radio sono anche debolmente luminosi per se stessi. Le loro radiazioni alterano stabilmente molte delle sostanze che incontrano: così il platino cianuro di bario imbrunisce, il solfato di uranio ingiallisce, il quarzo trasparente si converte in

quarzo affumicato, il vetro diviene violetto e nero: esse provocano molte azioni sugli esseri organizzati, per esempio, distruggono l'epidermide e destano delle piaghe persistenti.

Il radio è una sorgente continua di calore: il bromuro di radio ad esempio ne sviluppa tanto da fondere in un'ora un peso di ghiaccio uguale al proprio.

§ 12. — *Radiazioni delle sostanze radioattive.* — L'esame dell'irraggiamento delle sostanze radioattive ed i suoi risultati presentano un interesse scientifico di prim'ordine.

Intanto tale irraggiamento è in parte sensibile ai campi magnetici ed elettrostatici e per mezzo di questi si può constatare che esso è eterogeneo e si possono discriminare le varie parti di cui è costituito.

Si trova che una parte è costituita di particelle elettrizzate positivamente, un'altra parte è elettrizzata negativamente ed una parte è neutra.

Quest'ultima ha proprietà analoghe ai raggi Röntgen e forse ha comune con questi la natura. I raggi di questa parte vengono chiamati raggi γ. I raggi di elettricità negativa chiamati raggi β, risultano con le stesse caratteristiche dei raggi catodici. Presentano lo stesso rapporto q/m e sono perciò da ritenere corpuscoli dotati di grande velocità.

La parte costituita di particelle positive (raggi α) è quella che merita un più profondo studio.

Esse vengono deviate assai più difficilmente dei raggi β e presentano una caratteristica notevole nel destare la fluorescenza. Mentre la fluorescenza dei raggi β si presenta con una luminosità fissa quella destata dai raggi α osservata ad occhio nudo appare fluttuante e osservata con la lente si mostra costituita di tante scintilline che compariscono e spariscono rapidamente quà e là. In queste scintilline si è già indotti a vedere una immagine degli urti esercitati sulle sostanze fluorescenti dai raggi α.

Con diversi mezzi si possono rivelare anche le cariche elettriche portate dai raggi α e β. Qui mi accontenterò di mostarvi un grazioso apparecchio trovato da Strutt e modificato dal Righi che mostra in modo evidente la carica positiva dei raggi α.

Esso è così costituito (fig. 9). Un blocchetto isolante *E* sorregge un'ampollina *F* di vetro che contiene qualche milligrammo di bromuro di radio, ed è fasciata in basso da un anello di stagnola, che è a sua volta riunito a un piccolo elettroscopio *G*. Tutto questo è racchiuso in un tubo più grande, in cui si può fare il vuoto. Una asticella metallica *h*, può esser messa in comunicazione col suolo. È necessario praticare in questo apparecchio un vuoto assai spinto perchè il gas circondante l'ampollina e l'elettroscopio, ionizzato dall'azione dei raggi uscenti dal radio, non disperda la carica.

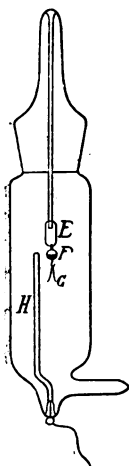
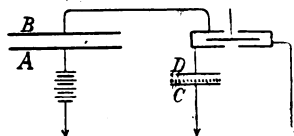



Fig. 9.

Siccome i raggi α sono assai meno penetranti dei raggi β, rimangono facilmente imprigionati nell'involucro che circonda la sostanza radioattiva, mentre i raggi β l'attraversano liberamente. Perciò una carica elettrica positiva si accumula nell'involucro, e il piccolo elettroscopio a questo adattato ce la rivela. In pochi istanti noi vediamo salire la foglia sino a toccare la lastrina *h*, scaricarsi, e cadere, e poi di nuovo salire e così via.

La natura delle particelle positive è fuori di dubbio materiale giacchè il rapporto della loro carica alla massa è minore dell'analogo rapporto dell'atomo di idrogeno. Resta ora da vedere a che atomo appartiene la particella positiva. Basta per questo conoscere la carica portata da una particella α giacchè poi dal rapporto q/m si deduce subito la sua massa.

Fig. 10.

La numerazione delle particelle α è stata fatta da Rutherford e Geiger con un metodo elettrico. Il principio del metodo è il seguente: delle due armature di un condensatore, una *A* era collegata con il polo negativo di una batteria di accumulatori di cui il polo positivo era a terra, e l'altra *B* era posta in comunicazione con una coppia di quadranti di un elettrometro di cui l'altra coppia era a terra, mentre l'ago era mantenuto a un alto potenziale (fig. 10).

In queste condizioni se nell'intervallo fra *A* e *B* si faceva arrivare una sola particella α, la ionizzazione da questa prodotta deter-

minava una corrente fra A e B che caricava il piatto B. Conseguentemente l'ago subiva una deviazione brusca.

Disponendo di una sorgente radioattiva messa in modo che del suo irradiamento α una parte ben determinata passasse fra i piatti del condensatore: e aggiustando le cose in modo da introdurre poche particelle α al minuto, così da poter comodamente contare gli impulsi subiti dall'ago in un certo tempo, dal numero di questi impulsi si poteva dedurre il numero dei raggi emessi dal prodotto radioattivo in quel tempo.

I due sperimentatori per ottenere che l'ago dell'elettrometro ritornasse a zero automaticamente dopo ogni impulso, adoperavano un altro condensatore costituito da due piatti orizzontali dei quali l'armatura superiore D era isolata e posta in comunicazione con B, l'altra, C, era a terra e portava distesa sulla sua superficie una sostanza debolmente radioattiva. Appena per effetto della ionizzazione prodotta da un raggio α il piatto B riceveva una carica che faceva deviare l'elettrometro, questa carica era neutralizzata dagli ioni di segno opposto attratti dal piatto D in un intervallo di tempo assai breve perchè l'ago tornasse a zero prima che un altro raggio α provenisse nel condensatore a determinare un nuovo impulso nell'ago stesso.

In pratica per eseguire la determinazione, al posto del condensatore A B fu sostituito (fig. 11) un condensatore cilindrico costituito da un tubo di ottone A e da un filo a questo coassiale L. Due tappi di ebanite chiudevano il tubo talchè nel suo interno poteva operarsi una rarefazione. In uno di questi tappi è praticato un foro O chiuso da una lamina di mica che permette il passaggio dei raggi α. A questo condensatore è innestato un lungo tubo T che a una estremità porta la sorgente di raggi α. Un rubinetto R separa il tubo dal condensatore e permette di escludere da quest' ultimo l'ingresso dei raggi. Naturalmente a fine di permettere ai raggi α un lungo percorso, nel tubo T è stata operata una altissima rarefazione.

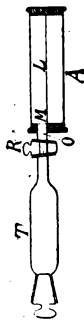



Fig. 11.

Così Rutherford e Geiger poterono limitare a 4 o 5 al minuto il numero delle particelle che penetravano in A. Ora conoscendo l'area s del diaframma e la distanza r di questo diaframma dalla sorgente,

il numero n di impulsi osservati dall'elettrometro in un secondo, ammettendo che il numero N medio totale delle particelle emesse dalla sostanza sia uniformemente distribuito in tutte le direzioni si ha

$$N = \frac{4 \pi r^2 n}{s}$$

Così si è potuto stabilire che un grammo di radio emette $3{,}4 \times 10^{-10}$ particelle α al secondo.

Resta ora da determinare la carica totale trasportata dalle particelle α emesse in un secondo da una determinata quantità di radio. Per questo si riceve una porzione dell'irraggiamento totale sopra un elettrodo posto in comunicazione con un elettrometro che permette di misurare la carica ricevuta dall'elettrodo stesso in un secondo.

Conoscendo la carica complessiva e il loro numero si sa qual'è la carica individuale. Si è trovato che la carica di una particella α è di 3×10^{-20} *u. e. m.* e che conseguentemente la loro massa è 4, eguale quindi a quella dell'atomo di Elio.

§ 13. — *Evoluzione della materia.* — Dobbiamo ora tentare un'interpretazione dei fatti studiati in modo da riunirli in una teoria, della quale essi appariscano come conseguenza naturale.

Per questo ricordiamo come i fenomeni della radioattività ci siano sempre apparsi puramente relativi agli atomi. Essi sono indipendenti dallo stato di aggregazione delle sostanze ed i composti hanno un'attività pari a quella che compete alla quantità di elemento radioattivo in essi contenuto.

L'energia che si manifesta nelle reazioni radioattive è sempre straordinariamente grande rispetto a quella che entra in gioco nelle ordinarie reazioni chimiche. In ogni trasformazione radioattiva accompagnata da emissione di raggi α l'energia sviluppata è 100.000 volte più grande, a parità di peso, di quella svolta nelle combinazioni chimiche più energiche.

Infine il processo radioattivo non sembra menomamente influenzato dalla temperatura, la quale pure ha tanta parte nei processi chimici ordinari che implicano soltanto la scomposizione di molecole.

Tutto ciò che avviene nel campo della radioattività succede al di fuori dei nostri mezzi. La chimica che possiede tante risorse per

unire e per separare gli atomi, non ha nessuna facoltà di provocare o di impedire le trasformazioni radioattive. Essa non può nemmeno accelerare o ritardare quei processi, giacchè le velocità delle trasformazioni radioattive sono del tutto indipendenti dalle condizioni chimiche nelle quali esse avvengono.

Tutto ciò induce a credere che nei fenomeni radioattivi noi ci troviamo di fronte a fatti essenzialmente diversi da quelli che la chimica e la fisica ci hanno insegnato a conoscere fin quì. Per questo, se pure in qualche modo vogliamo rappresentarci il meccanismo dei fenomeni radioattivi, non possiamo logicamente ricercare la loro causa nelle azioni molecolari ed atomiche. Ma siccome lo spirito della scienza deve essere conservatore affinchè ogni progresso nella via della conoscenza sia opera di completamento, non di sconvolgimento, così noi cercheremo di conciliare la spiegazione dei nuovi fenomeni con le antiche teorie, ampliando queste di quanto sarà necessario. Un modo di far ciò, forse il più semplice, consiste nel ritenere che le azioni radioattive abbiamo la loro sede nell'interno dell'atomo e che le trasformazioni radioattive siano vere e proprie trasformazioni atomiche.

Ammesso che il fenomeno della radioattività abbia sede nell'interno dell'atomo, cerchiamo di precisarne la natura.

La spontaneità assoluta del processo fa pensare che gli atomi delle sostanze radioattive siano in uno stato di equilibrio instabile. Ciò è tanto più ammissibile in quanto che gli atomi suddetti hanno un grande peso e quindi possiedono probabilmente una costituzione assai complessa.

Se ciò è vero, il processo radioattivo deve essere diretto in modo da far assumere agli atomi assettamenti sempre più stabili.

Ma nel fatto si verifica veramente la produzione di nuovi atomi da altri atomi? La risposta a questa domanda non appartiene più al campo dell'ipotesi, ma è oramai un fatto sperimentale ben constatato.

Ramsay e Soddy accumularono in un tubo munito di elettrodi una certa quantità di emanazione di radio per farne l'esame spettroscopico, lo spettro osservato conteneva le righe caratteristiche dell'emanazione. Dopo tre giorni apparve la riga *D* dell'elio e dopo cinque giorni lo spettro di questo gas si mostrava completo. Così un

elemento come l'elio faceva la sua apparizione nel tubo contenente l'emanazione nelle stesse condizioni in cui potrebbe comparire un composto come l'anidride carbonica in un ambiente dove non si trovasse altro che carbonato di calcio. Dunque non c'è più nessun dubbio sulla possibilità della produzione di un corpo elementare a partire da materiali che non lo contengono.

Ma non è l'elio l'unico prodotto che abbia luogo nelle trasformazioni radioattive anzi non è neanche il principale. Per mezzo di reazioni chimiche semplicissime Crookes e Bequerel hanno separato dall'uranio delle specie chimiche semplici perfettamente definite, che pur erano derivate dall'uranio stesso e che alla loro volta danno luogo ad altre specie chimiche. Prodotti di trasformazioni succedentisi l'uno all'altro in lunga serie danno il radio, il torio e l'attinio. La materia radioattiva subisce una evoluzione dovuta a un processo che ha sede nell'atomo e che grossolanamente abbiamo paragonato a esplosioni di edifizi atomici. Queste esplosioni una volta iniziate non danno subito luogo ad assettamenti stabili, ma determinano una successione di configurazioni che corrispondono a tante specie chimiche non differenti dalle ordinarie specie chimiche se non per la loro vita effimera.

Queste nuove sostanze, detriti, per così dire, delle esplosioni atomiche hanno caratteri chimici e fisici ben distinti. Alcune di esse manifestano proprietà che inducono a classificarle fra i solidi, altre si comportano come gas.

Fra questi ultimi sono degne di nota le emanazioni radioattive che accompagnagno il radio, il torio e l'attinio. Se mettiamo una soluzione di un sale di radio in comunicazione con un pallone spalmato nella sua parete interna con solfuro di zinco troviano che una luminosità si propaga nel tubo come fosse dovuta a un gas che si diffonde nell'aria. E che si tratti veramente di un gas si dimostra con la proprietà che esso ha di condensarsi a bassa temperatura. Così se sotto al pallone suddetto si mette un altro pallone in comunicazione col primo per mezzo di un tubo e si immerge questo ultimo nell'aria liquida, si trova che la luminosità si concentra a poco a poco nel pallone inferiore. Estraendo il pallone dall'aria liquida si osserva che la luminosità torna a invadere tutto il tubo per l'evaporazione che si produce dell'emanazione.

Lo studio minuto di queste trasformazioni ha fatto ritenere che la trasformazione di un un atomo della sostanza radioattiva quando è accompagnata da irraggiamento α dia luogo all'atomo della sottospecie immediata con l'espulsione di una sola particella α. Così l'atomo di radio emettendo una particella α dà luogo all'atomo di emanazione, questa emettendo pure una particella α dà luogo all'atomo di radio *A*, una sostanza che non è mai stata raccolta in quantità ponderabili, ma che si rivela tuttavia con le sue proprietà radioattive comportandosi come un pulviscolo che si deposita sui solidi immersi nell'emanazione di radio.

Dal radio *A* ha origine il radio *B*, da questo il radio *C* e così di seguito per una successione della quale l'ultimo termine noto è il radio *F* identico al Polonio scoperto dalla Signora Curie nelle pechblende radifere.

In tal modo il radio è il progenitore di tanti prodotti che costituiscono una famiglia radioattiva.

Altre famiglie radioattive hanno come capo stipiti l'Uranio, che dà origine all'Uranio *X*, il Torio che genera direttamente il Radiotorio e per successive trasformazioni il torio *X*, l'emanazione di torio, il torio *A*, il torio *B* e il torio *C*; l'attinio che dà origine col solito processo al radioattinio; all'attinio *X*, all'emanazione di attinio, all'attinio *A*, *B*, *C*.

In quanto all'Elio che si sviluppa dalle sostanze radioattive l'ipotesi più probabile è che esso sia costituito dalle particelle α. La loro massa uguale a quella dell'atomo di Elio dà già un grande fondamento all'ipotesi. Ma un'altra verifica più diretta può farsi calcolando se il numero delle particelle α emesse da una sostanza radioattiva in un certo tempo, coincide col numero di atomi che costituiscono la massa gassosa di elio sviluppata nello stesso tempo dalla stessa sostanza. Il calcolo di questo ultimo numero si eseguisce facilmente quando si conosca il volume di Elio nelle ordinarie condizioni di temperatura e di pressione, e questo volume è già stato misurato da Dewar; il numero dei raggi α emessi in un certo tempo si può ottenere col metodo di Rutherford che abbiamo già descritto; così abbiamo tutti gli elementi per fare la verifica suddetta. Ebbene se si eseguisce il calcolo si trova che il numero delle particelle α emesse in un secondo è proprio uguale al numero degli atomi che

entrano nell'elio sviluppato nello stesso tempo e questo è quanto di meglio si può desiderare come prova che realmente le particelle α sono atomi di elio.

Dunque questo è ancora un prodotto delle sostanze radioattive che emettono raggi α, ma è per così dire un prodotto collaterale che non trova posto nella successione degli elementi derivanti l'uno dall'altro e costituenti insieme la famiglia radioattiva.

Osserviamo che per le trasformazioni a raggi α l'atomo passando da un elemento alla sottospecie perde la massa 4. Sicchè procedendo con le trasformazioni l'atomo deve diventare sempre meno pesante fino a raggiungere quella stabilità che è caratteristica degli elementi ordinari e che arresta il processo radioattivo.

Della famiglia del radio si conoscono quattro prodotti a raggi α. Avendo il radio un peso atomico 226,5 l'ultimo prodotto noto che pure è radioattivo ed emette raggi α avrebbe un peso di 210,5 e conseguentemente il prodotto successivo, ignoto, avrebbe un peso atomico di 206,5 vicino al peso atomico del piombo. Ora è possibile che il piombo sia il prodotto finale delle trasformazioni del radio? L'esame dei materiali nei quali si riscontra il radio ha dimostrato che essi contengono sempre piombo.

Questi fatti, insieme ad altri di cui non credo necessario intrattenervi qui, danno una grande probabilità che il piombo sia la forma finale di equilibrio della famiglia del radio.

I recenti studi hanno poi dimostrato che il radio non è il capostipite della sua famiglia, ma discende a sua volta dall'uranio. Fra questi due elementi, oltre all'uranio già noto, sono stati trovati il radio-uranio e il jonio.

Sembrò per un momento che la trasformazione atomica non fosse particolare delle sostanze radioattive, ma si estendesse anche alle sostanze comuni. E ciò quando Ramsay annunziò di avere osservato la trasformazione del rame in sodio e in litio. Le esperienze successive della Sig. Curie contraddissero queste esperienze, ma allo stato attuale delle nostre conoscenze possiamo asserire che tale trasforma ione è possibile e non urta contro nessuno dei principi scientifici.

Soltanto, per quello che noi sappiamo si può dire che, quand'anche questa trasformazione esistesse, essa si produrrebbe nel

senso da dar luogo ad atomi meno pesanti. Anche la produzione dell'oro, il sogno degli alchimisti, non appare più, alla luce delle moderne teorie, insensata. Tuttavia si può osservare col Soddy che l'energia che in tale trasformazione si libererebbe sarebbe tanta, da diventare essa il prodotto principale di una fabbricazione di cui l' oro sarebbe un prodotto secondario.

LUIGI MAGRI

LA SCINTILLA E L'ARCO

§ 1. — *Corrente di saturazione e scintilla.* — La scintilla elettrica e l'arco sono stati fino a pochi anni or sono fenomeni inesplicabili: la ipotesi della ionizzazione dei gas ne ha dato una spiegazione soddisfacente.

È noto a tutti come si spieghi la conducibilità acquistata dall'aria e dagli altri gas sotto l'azione di raggi Röntgen, raggi α, β e γ ammettendo che questi ionizzino un certo numero dei loro atomi separandone un elettrone e dando luogo così a un corpuscolo negativo e ad un ione positivo. Gli ioni e i corpuscoli polarizzando le molecole e gli atomi circostanti ed attirandoli possono aggregarsene un certo numero, così che in un gas ionizzato potranno esservi corpuscoli negativi, ioni positivi monoatomici, ioni positivi e negativi portanti ciascuno la carica di un elettrone, ma aventi la massa di più atomi o anche di più molecole.

Se ora stabiliamo in un gas così ionizzato un campo elettrico (per es. per mezzo di due elettrodi portati a potenziali di segno diverso) i moti di questi ioni avverranno secondo le linee di forza per gli ioni positivi, in senso contrario per gli ioni negativi, e si stabilirà così la corrente convettiva fra i due elettrodi. Potremo considerare questi ioni come proiettili muoventisi in un mezzo con attrito; la loro velocità media a parità di altre circostanze sarà proporzionale all'intensità del campo. Ora, col crescere di questa velocità, per ogni corpuscolo e per ogni ione positivo diverrà sempre più piccola la possibilità di aggregarsi altre molecole ad altri atomi, così che è supponibile che per certi valori del campo si arrivi ad avere in seno al gas solo corpuscoli negativi e ioni positivi monoatomici.

Come è noto già dalle più vecchie esperienze eseguite sulla ionizzazione dei gas, la corrente di convezione fra i due elettrodi

cresce dapprima col crescere del campo fino ad un massimo, al di là del quale, se si mantiene la stessa azione dell'agente ionizzante, essa seguita a mantenersi costante per un largo intervallo al crescere del campo stesso. La corrente convettiva che ha raggiunto questa intensità costante, si chiama *corrente di saturazione.*

L'ipotesi della ionizzazione dei gas rende conto molto bene di questi fatti: se il campo è debole è piccola anche la velocità degli ioni, quindi il tempo che essi impiegano per arrivare agli elettrodi è sufficientemente lungo perchè questi, obbedendo alle loro reciproche forze di attrazione, possano durante il tragitto ricombinarsi tra loro in numero ragguardevole; ma col crescere del campo, cresce la loro velocità, diminuisce il tempo che impiegano nel loro percorso, e le ricombinazioni si fanno via via meno frequenti fino a divenire così poco numerose da non avere più nessuna importanza. Tutti gli ioni prodotti dall'agente nel campo arrivano allora agli elettrodi, si ha quindi la corrente di saturazione.

Teoria e esperienza sono poi perfettamente d'accordo nello stabilire che il valore del campo necessario per ottenere la corrente di saturazione cresce col crescere dell'ionizzazione del gas, perchè col crescere del numero di ioni per ogni unità di volume cresce molto rapidamente il numero di ricombinazioni per ogni unità di tempo.

L'esperienza però ci mostra un altro fatto di singolare importanza: se si aumenta il campo molto al di là del valore pel quale era stata raggiunta la corrente di saturazione, ad un determinato momento la corrente ricomincia a crescere e cresce con grande rapidità, fino a che una corrente elettrica enormemente più intensa di quella di saturazione si stabilisce fra gli elettrodi, dando luogo nel gas che attraversa a quell'insieme di fenomeni calorifici, luminosi, meccanici e chimici che indichiamo col nome di scintilla elettrica.

Nell'ipotesi ora accennata l'accrescimento di questa corrente significa produzione di un numero di ioni maggiore di quello creato dall'agente ionizzante, ci dobbiamo dunque domandare quale è il nuovo fatto che è avvenuto e che ha potuto dar luogo a questa ionizzazione così rapida e così abbondante.

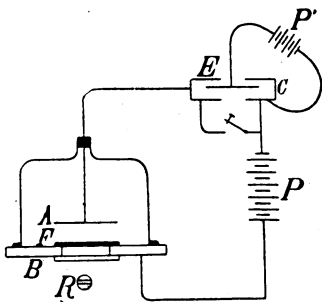
L'ipotesi che subito si affaccia alla mente è quella di supporre che gli ioni stessi, che si muovono nel campo con velocità crescente,

quando abbiano acquistato una certa forza viva, possano essi stessi ionizzare per urto le molecole e gli atomi neutri che incontrano nel loro cammino.

Questa ipotesi si presta ad una ricerca rigorosa sia teorica che sperimentale, ricerca che è stata ottimamente condotta dal Thownsend (1). I risultati a cui egli è arrivato portano tanta luce sul meccanismo della scarica, che è necessario si dicano alcune poche parole riassuntive sulle sue vedute teoriche e sul modo con cui egli ha condotto le esperienze.

§ 2. — *Ricerche del Thownsend su la conduzione nei gas.* — Sul disco *B* (fig. 12) forato e chiuso con una lastra di alluminio è collocata una campana di vetro a tenuta d'aria portante, ben isolato, il disco metallico *A*. Al di sotto di *B* si trova una certa quantità di sostanza radioattiva *R* che ionizza con azione costante il gas interposto fra *A* ed *F*. Questo gas per mezzo di una macchina pneumatica potrà esser portato a quella rarefazione che crederemo più conveniente. Il disco *B* è collegato con uno dei poli di una pila *P* di un numero variabile di elementi; l'altro polo di questa pila è unito ad una delle coppie di quadranti di un elettrometro. L'armatura *A* è collegata con l'altra coppia di quadranti. L'ago e la coppia *C* sono in comunicazione coi due poli di una pila di f. e. m. elevata. Un tasto può mettere in comunicazione tra loro le due coppie di quadranti, ed allora l'ago è allo zero della scala; se togliamo invece la comunicazione gli ioni che si muovono nel campo tra *A* ed *F* caricano la lastra *A* e la velocità di carica (e quindi la velocità con cui si muove l'ago dell'elettrometro) sono proporzionali all'intensità della corrente convettiva che così si stabilisce.

Fig. 12.

Se con tale disposizione misuriamo l'intensità della corrente per valori del campo continuamente crescenti troviamo una curva del

(1) Ph. Mg. vol. 1, pag. 198 (1901).
» » vol. 6, pag. 598 (1903).

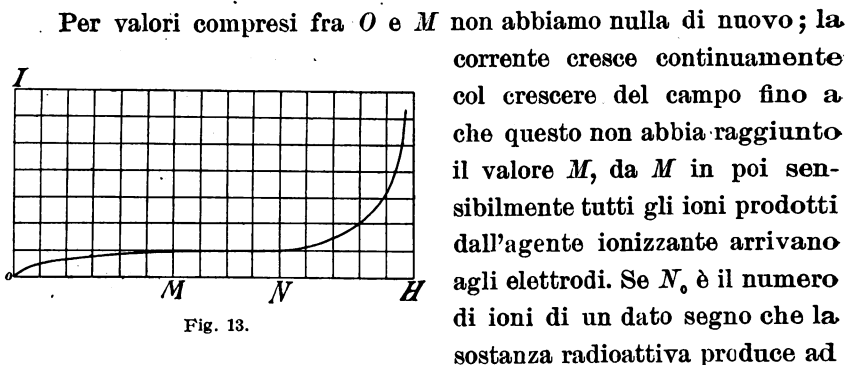
genere di quella qui rappresentata, (fig. 13), dove sulle ascisse abbiamo i valori del campo, sulle ordinate le intensità della corrente convettiva.

Per valori compresi fra O e M non abbiamo nulla di nuovo; la corrente cresce continuamente col crescere del campo fino a che questo non abbia raggiunto il valore M, da M in poi sensibilmente tutti gli ioni prodotti dall'agente ionizzante arrivano agli elettrodi. Se N_0 è il numero di ioni di un dato segno che la sostanza radioattiva produce ad ogni secondo fra A e B, se ε è la carica di ciascun ione, l'intensità della corrente di saturazione i_0 sarà data da

Fig. 13.

$$i_0 = \varepsilon N_0$$

E finchè, come abbiamo accennato, non succede qualche fatto nuovo, il valore di i_0 non potrà crescere col crescere del campo, perchè questo ormai ha raggiunto un tal valore che estrae *tutti* gli ioni che la sostanza radioattiva produce. Ma arrivati al valore N del campo l'esperienza mostra che il fatto nuovo succede, poichè la corrente comincia a crescere e cresce rapidamente.

Vediamo ora come il Thownsend ha potuto mettere in equazione il problema.

Si ricordi che per questi valori del campo gli ioni e i corpuscoli si muovono già con velocità tale da non aggregarsi verosimilmente altri atomi e altre molecole, così che potremo limitarci ad esaminare il moto dei corpuscoli e degli ioni monovalenti.

In questo caso dunque la differenza delle masse fra ioni positivi e corpuscoli negativi è molto grande, i corpuscoli per la loro piccolezza hanno un percorso libero maggiore degli ioni positivi; solo quelli dapprima potranno acquistare una velocità e quindi una forza viva sufficiente per produrre la ionizzazione per urto. Indichiamo con α il numero di ionizzazioni che un elettrone può produrre per urto nel percorso di un centimetro. Se il gas fra A e B è uniformemente ionizzato ed n_0 è il numero di ioni prodotti in ogni

unità di tempo nello strato dello spessore di un centimetro dall'agente ionizzante, se a è la distanza fra le due lastre, il numero totale di ioni di un dato segno liberati dalla azione della sostanza radioattiva sarà $n_0\ a$, e l'intensità di saturazione:

$$i_0 = n_0\ a\ \varepsilon.$$

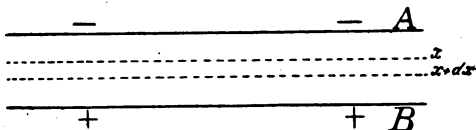
Consideriamo un piano parallelo alle due lastre alla distanza x dalla lastra negativa, supponiamo il campo sufficientemente intenso perchè gli elettroni possano produrre la ionizzazione per urto, e sia n il numero di ioni che attraversano questo piano. Il numero di ioni prodotti per urto da questi n corpuscoli che attraversano il piano che dista da A di x (fig. 14) per arrivare al piano che dista di $x + d\ x$ sarà

$$\alpha\ n\ d\ x,$$

Fig. 14.

che insieme con quelli prodotti dalle radiazioni formeranno un numero totale di ioni prodotti nello strato $d\ x$

$$d\ n = \alpha\ n\ d\ x + n_0\ d\ x.$$

Integrando fra zero e a si ottiene il numero totale di ioni che arrivano alla lastra positiva nell'unità di tempo

$$n = \frac{n_0}{\alpha}\left(e^{a\alpha} - 1\right),$$

con una corrente

$$i = n\,\varepsilon = \frac{n_0}{\alpha}\left(e^{a\alpha} - 1\right)\varepsilon$$

e cioè:

$$\frac{i}{i_0} = \frac{1}{a\ \alpha}\left(e^{a\alpha} - 1\right).$$

In queste esperienze i, i_0, a sono tutti misurabili e quindi possiamo dai risultati sperimentali dedurre il valore di α.

Così il Thownsend ha verificato che mantenendo costante la intensità del campo e la pressione del gas il valore di α non varia col variare della distanza fra i piatti A e B; variando poi la distanza d,

ha calcolato il valore di i ed ha trovato valori in accordo con i risultati sperimentali fino a che il campo non supera certi limiti.

Ma elevando il valore del campo i/i_0 cresce molto più rapidamente di quanto non indichi la formula del Thownsend ora riportata; viene quindi naturale supporre che incominci la dissociazione anche da parte degli ioni positivi. Sia m_0 il numero di ioni che partono dall'armatura negativa ed m il numero totale degli ioni che arrivano alla armatura positiva; sia p il numero totale degli ioni prodotti nello strato compreso tra l'armatura negativa e il piano x, q il numero di quelli prodotti nello strato compreso tra questo piano e la armatura positiva: si ha

$$m = m_0 + p + q.$$

Sia α al solito il numero di ioni di ciascuna specie prodotto per ogni centimetro di percorso da un elettrone e β quello prodotto da ogni ione positivo, si può adesso cercare quale è il numero degli ioni prodotti fra due piani distanti x ed $x + dx$ dell'armatura negativa (fig. 15). Abbiamo che gli $m_0 + p$ ioni che attraversano lo strato in un senso produrranno

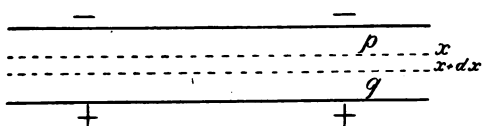



Fig. 15.

$$\alpha\,(m_0 + p)\,dx$$

ioni e i q ioni positivi che l'attraversano in senso contrario produrranno altri

$$\beta\,q\,dx$$

ioni negativi; quindi potremo scrivere

$$dp = \alpha\,(m_0 + p)\,dx + \beta\,q\,dx,$$

e poichè

$$m = m_0 + p + q$$

$$\frac{dp}{dx} = (\alpha - \beta)\,(m_0 + p) + m\beta$$

e

$$p = m_0 + \left(\frac{m\beta}{\alpha - \beta}\right)\left[e^{(\alpha-\beta)x} - 1\right]$$

e siccome, per $x = a$, $q = o$ e $p = m - m_0$, si ha

$$\frac{m}{m_0} = \frac{i}{i_0} = \frac{(\alpha - \beta)\,e^{(\alpha-\beta)a}}{\alpha - \beta\,e^{(\alpha-\beta)a}}$$

che rappresenta bene i risultati sperimentali. Essa può assumere valori grandissimi col tendere di α al valore

$$\beta e^{(\alpha-\beta)a}$$

I dati che compariscono nelle formule sopra accennate sono perfettamente misurabili e si possono da quelli ricavare i valori di α e di β. Le misure eseguite da Thownsend sono in perfetto accordo con i resultati teorici. Così che possiamo ritenere provato che l'andamento del fenomeno è veramente il seguente: raggiunta la corrente di saturazione, crescendo ancora il campo, si arriva ad una intensità di questo per la quale comincia la ionizzazione per urto da parte degli elettroni già esistenti nel campo, e la corrente convettiva cresce, ma, se sono in gioco soltanto gli elettroni, il rapporto

$$\frac{i}{i_0} = \frac{1}{a x} \left(e^{a x} - 1 \right)$$

non può raggiungere valori estremamente grandi. Cioè con le cariche negative soltanto non si può avere la scintilla. Di più la stessa corrente convettiva cesserebbe se cessasse l'azione dell'agente ionizzante, poichè essendo tutti gli elettroni diretti nello stesso senso, cessando l'azione dell'agente ionizzante, essi si porterebbero in pochi istanti tutti all'armatura positiva e non avrebbe più luogo nessun trasporto di carica elettrica e nessuna ionizzazione per urto.

Ma così non accade se il campo supera un valore tale che entrino in giuoco anche gli ioni positivi, allora i proiettili capaci di produrre l'ionizzazione si muovono nei due sensi e si può arrivare ad un valore tale del campo che la ionizzazione per urto da parte di tutte e due le specie di ioni proceda rapidamente, con la produzione istantanea di un enorme numero di ioni, con una intensità di corrente enormemente maggiore di quella della corrente di saturazione, con un dispendio notevole di energia: in questo momento si ha la scintilla. La produzione di ioni quando il campo abbia raggiunto questa intensità non è più legata alla presenza dell'agente ionizzante: il campo se li produce da sè, la corrente che si stabilisce è autonoma.

Del resto la dissimetria delle cariche elettriche ionizzanti, che ha tanta importanza nel procedere di questi fenomeni, può mostrarsi facilmente sostituendo al condensatore piano adoperato nelle espe-

rienze precedenti un condensatore formato da un tubo metallico e da un filo. Otteniamo così fra le due armature un campo non uniforme e più intenso vicino al filo. Se la differenza di potenziale fra il filo e il tubo non supera quel certo limite per il quale la corrente cresce al di là del valore della corrente di saturazione, la corrente convettiva che si stabilisce è indipendente dal segno della carica del tubo e ciò s' intende bene perchè i soli ioni presenti nel campo sono quelli liberati dall'agente ionizzante. Se la differenza di potenziale è tale che in nessun punto del campo possano entrare in gioco gli ioni positivi allora la corrente sarà molto più intensa quando è positivo il filo, il contrario accadrà se il campo sarà così intenso da far produrre l'ionizzazione anche degli ioni positivi.

Vediamo ora come questa teoria renda conto dei fenomeni che precedono e accompagnano lo scoccare della scintilla: passiamo in rapida rassegna i fatti più importanti e cerchiamo di darne una spiegazione.

§ 3. — *Meccanismo della scintilla elettrica.* — La scintilla avviene come ognun sa fra due elettrodi qualunque posti in un gas allo stato naturale e senza nessuna preventiva ionizzazione con agenti come raggi α, β, ecc.; però le esperienze sulla dispersione elettrica dei gas dimostrano che nelle condizioni ordinarie questi non sono mai assolutamente liberi da ioni, perchè, sia pur debolmente, disperdono sempre un po' la carica.

La presenza di questi pochi ioni sempre esistenti fra gli elettrodi di uno spinterometro immerso in un gas basta a rendere conto del prodursi della scintilla, quando si pensi che essi nel loro moto nel campo ne creano di nuovi, e questi dei nuovi ancora, fino a che, raggiunto un tal valore del campo per cui, come abbiamo visto, entrino in gioco ioni positivi ed elettroni, la scarica può avvenire.

Le più comuni esperienze mostrano pure che in questo caso, e specialmente in un ambiente chiuso, la scarica non si stabilisce a una differenza di potenziale costante, ma in un modo irregolare con valori del campo assai diversi tra loro. Per renderci conto di ciò basta pensare che il numero di ioni esistenti sia troppo piccolo per avviare la scarica quando il campo ha già raggiunto la intensità necessaria per produrla, e che si superi anche notevolmente questo valore senza che la scintilla si stabilisca.

Ciò vien provato da questi fatti: se si misura il potenziale di scarica fra due elettrodi posti nell'aria o meglio in uno spazio chiuso si vedrà che questo varia moltissimo da una scintilla all'altra: la prima scarica è per lo più quella che richiede maggior differenza di potenziale, le successive di solito scoccano più facilmente: se invece avviciniamo agli elettrodi una sostanza radioattiva, o illuminiamo il catodo con raggi ultravioletti o con raggi Röntgen, allora, se l'agente ionizzante ha un'azione sufficientemente energica, la scarica si stabilisce ad un potenziale costante, uguale o inferiore al valor minimo dei potenziali di scarica prima raggiunti. L'agente ionizzante ha fornito dunque gli ioni necessari al regolare avviamento del fenomeno. Si suol dire che ha eliminato il ritardo di scarica.

Le misure fatte in queste condizioni hanno mostrato che, *con campi uniformi il potenziale di scarica dipende unicamente dal prodotto della distanza esplosiva per la densità del gas in cui avviene la scintilla* (legge di Paschen): a questo stesso risultato conduce la teoria del Thownsend quando si osservi in qual maniera i numeri α e β di dissociazioni operate per ogni centimetro dagli elettroni e dagli ioni negativi dipendono dal campo e dal numero di molecole per centimetro. Se il numero di molecole per centimetro cubo, ossia la densità del gas, cresce nel rapporto n, il numero di collisioni per centimetro cresce nello stesso rapporto, ma diminuisce invece nello stesso rapporto il percorso libero medio degli ioni. Ora poichè in campi uniformi la forza viva acquistata dagli ioni è appunto proporzionale al loro percorso libero, ne deriva necessariamente la legge ora ricordata.

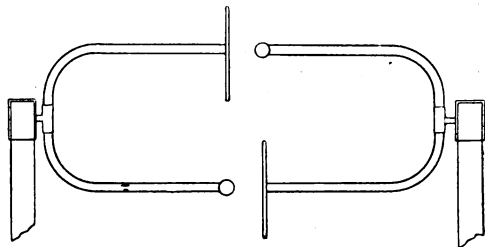



Fig. 16.

Ripetiamo ora un'antica esperienza del Belli: costruiamo cioè uno spinterometro come mostra la fig. 16, costituito da due bracci metallici piegati ad U e portanti ciascuno una sferetta di pochi millimetri di diametro ed un disco di qualche centimetro di raggio. Sorreggiamoli in modo che vengano di fronte a ciascun disco una sferetta e che siano uguali le distanze esplosive. Se queste non su-

perano pochi millimetri la scintilla scoccherà sempre in quella parte dello spinterometro in cui è negativa la pallina e positivo il disco: se aumentiamo invece la distanza esplosiva fino a qualche centimetro allora, come ha notato il Righi, vedremo che la scintilla scocca costantemente dalla sferetta positiva al disco negativo.

Ci rendiamo ragione di questi fatti quando si tenga conto della differenza di grandezza fra gli ioni positivi e gli elettroni, della loro diversa mobilità e quando si pensi infine che per l'accumularsi delle cariche elettriche di un dato segno in certe regioni del campo, la distribuzione della sua intensità resta notevolmente modificata.

Così se nella esperienza precedente [1] la distanza fra gli elettrodi è breve e la sferetta è negativa, gli ioni positivi si accumuleranno intorno ad essa, e cioè nelle regioni dove il campo è più intenso e dove potranno quindi produrre l'ionizzazione, mentre gli elettroni si porteranno vicino al disco, e poichè basta ad essi per essere attivi un campo molto più debole, potranno produrre ionizzazione anche in vicinanza di quello e così tutte e due le specie di cariche entreranno questa volta quasi contemporaneamente in giuoco.

Quando invece è positiva la pallina, allora gli ioni positivi si muovono verso il disco accumulandosi nelle regioni dove il campo è più debole, e dove quindi non possono produrre l'ionizzazione per urto altro che innalzando grandemente la differenza di potenziale fra gli elettrodi e dopo che da un pezzo è entrata in gioco l'azione degli ioni negativi: ecco perchè in questo caso occorre una f. e. m. esplosiva maggiore.

Se però aumentiamo la distanza esplosiva le cose accadono, come abbiamo visto, in senso opposto.

Per rendere conto di questo fatto credo si debba fare attenzione non solo alla dissimmetria del campo, ma sopra tutto alla diversa mobilità delle due specie di ioni.

Se la sferetta è negativa e il disco è positivo, gli elettroni per la loro mobilità si portano subito in gran copia verso il disco in una

---

[1] A. R. Occhialini. — I gas compressi come dielettrici e come conduttori, pag. 112 (Mariotti, Pisa, 1906).

regione dove sono poco attivi, cadono rapidamente su quello e si perde quindi una gran parte della loro azione. Per conseguenza nelle vicinanze della sfera arriva un numero scarso di ioni positivi e la moltiplicazione delle cariche non avviene. La scintilla si stabilisce con difficoltà.

Viceversa facendo positiva la sferetta gli elettroni che si formano concorrono tutti verso di essa producendo ionizzazione in tutto il loro percorso, mentre gli ioni positivi per la loro minore mobilità restano in numero maggiore assai dei negativi nello spazio fra la pallina e il disco.

La presenza di tutte queste cariche positive altera profondamente il campo rendendo vicino al disco rapidissimo il gradiente del potenziale e forte quindi il campo stesso.

Vicino al disco allora potranno entrare in gioco gli ioni positivi e fornire i corpuscoli negativi necessari per una rapida e abbondante ionizzazione in vicinanza della sferetta, e la scarica si stabilirà molto più facilmente che nel caso prima accennato.

§ 4. — *Azione delle sostanze radioattive su la scintilla.* — Il fatto seguente potrà persuadere della importanza di questa alterazione del campo prodotta dall'accumularsi delle cariche vicino agli elettrodi. Se riuniamo ad un rocchetto due spinterometri in derivazione, uno dei quali sia fatto con punta e disco, e regoliamo le loro distanze esplosive in modo che la scintilla scocchi in tutti e due con uguale facilità, e se avviciniamo qualche milligrammo di radio allo spinterometro fatto con punta e disco, quando la distanza esplosiva è piccola abbiamo un notevole effetto facilitante dall'azione della sostanza radioattiva, e ciò per le ragioni che abbiamo già esposte. Ma se allontaniamo gli elettrodi ad una diecina di centimetri, allora l'azione della sostanza radioattiva è sempre impedente e si presenta solamente quando si faccia agire la radiazione vicino alla punta, quando questa sia in comunicazione col positivo del rocchetto. Cioè, il radio arresta la scarica nello spinterometro attivato e le scintille passano solo nell'altro. In altre parole si innalza la differenza di potenziale esplosivo tra i due elettrodi.

Ecco come possiamo spiegare questo fatto: intorno al positivo si accumulano gli elettroni e gli ioni positivi si portano e si accumulano vicino al disco, vicino agli elettrodi si ha quindi un gradiente

del potenziale molto rapido. La regione in cui comincia più attivamente la produzione di ioni è come abbiamo visto quella intorno alla punta positiva; se avviciniamo a questa il radio esso produce intorno ad essa una energica ionizzazione e quindi una notevole quantità di cariche dei due segni, ma mentre gli elettroni si muovono con molta rapidità verso la punta gli ioni positivi, per la loro maggior massa e per il fatto che vengono respinti in regioni in cui il campo è via via meno intenso, si muovono con molta minor velocità e vengono quindi ad accumularsi intorno alla punta stessa in quantità sufficiente per abbassare il valore del campo appunto in quella regione in cui è più vivo il lavoro di ionizzazione.

§ 5. — *Fiocchi e stellette.* — Tutti hanno notato che se la distansa esplosiva è lunga, specialmente se il campo è dissimmetrico, la scarica è preceduta dalla comparsa dei fiocchi e delle stellette. Anche queste sono scariche parziali che hanno un modo di formazione analogo a quello della scintilla. Se è grande la distanza esplosiva si raggiunge una certa differenza di potenziale per cui si son formate intorno agli elettrodi due regioni del campo assai estese nelle quali si compie la ionizzazione per urto, che restano separate da uno strato assai spesso in cui questa ionizzazione non succede.

La produzione di ioni nelle due regioni può essere così abbondante da dar luogo ai fatti luminosi accennati, ma se l'ionizzazione per urto non è efficace su tutta o quasi tutta una linea congiungente gli elettrodi la scintilla non avviene. Naturalmente, come è stato notato dal Tieri (1), anche su questi fiocchi il radio ha la stessa azione che sulla scintilla.

§ 6. — *Fenomeni luminosi della scintilla.* — Lo stabilirsi della scintilla è dovuto dunque al rapido prodursi di ionizzazione per urto; l'energia spesa in ogni intervallo di tempo e da ogni elemento di volume di gas attraversato dalla scarica è in questo caso grandissima. Della notevole quantità di energia per unità di volume e di tempo che in questo fatto si dissipa abbiamo un indice nei fenomeni luminosi che presenta la scarica.

L'esame spettroscopico della luce emessa dalla scintilla mostra

(1) N. C. serie 5, vol. 18, pag. 116 (1909).

uno spettro di righe, e precisamente quelle righe che si chiamano di alta eccitazione.

Osserviamo alcune di queste apparenze luminose.

Se facciamo agire una macchina elettrostatica senza condensatori con gli elettrodi a pochi centimetri di distanza vediamo le scintille quasi rettilinee e non uniformemente luminose. In generale esse presentano due tratti più luminosi in vicinanza degli elettrodi, dove è più intensa la ionizzazione. Se aumentiamo la capacità degli elettrodi, in modo che per eseguire il trasporto delle cariche su di essi accumulate sia necessaria la formazione di un gran numero di ioni allora la scintilla è grossa, rumorosa, vivissima, splendente. Essa emette ancora lo spettro di righe, con molta intensità e ricchezza.

Le piccole scintilline che abbiamo prima prodotte non presentano una durata apprezzabile, ma questa va continuamente crescendo col crescere della quantità di elettricità messa in moto e dell'inerzia del circuito. La misura di questa durata si può fare osservando la scintilla nello specchio rotante o meglio fotografandola col metodo di Feddersen.

Lo splendore e la violenza esplosiva della scintilla crescono col crescere della pressione del gas in cui essa avviene e della quantità di elettricità messa in moto.

La colonna luminosa che congiunge gli elettrodi è qualche volta nettamente stratificata, e ciò appar naturale quando si pensi al modo di formazione della scarica nell'aria. Quando la quantità di elettricità da scaricarsi non è poi troppo piccola e quando il circuito di scarica non presenta un'inerzia trascurabile, cosa che succede quasi sempre, allora, come è noto, il fenomeno si complica e la scarica diviene oscillatoria.

Per analizzare convenientemente questo fenomeno dovremo giovarci dell'esame diretto della scintilla e della sua analisi con lo specchio rotante e con lo spettroscopio.

Per avere una capacità conveniente useremo due batterie di quattro condensatori ciascuna; disporremo in serie queste due batterie congiungendo l'armatura esterna di una di esse al capo di una grossa spirale di filo nudo avvolta su di un cilindro di vetro e l'armatura esterna dell'altra batteria ad un filo flessibile unito ad un contatto scorrevole sulla spirale stessa. Così potremo introdurre

nel circuito quel numero di spire che più si creda conveniente od escluderle tutte. Riuniremo poi le armature interne delle due batterie ai capi del rocchetto e agli elettrodi di uno spinterometro.

Esperimenteremo con scintille abbastanza lunghe (2,5 a 4 cm.) così potremo vederne meglio tutti i particolari.

Per cominciare comodamente l'osservazione diretta disponiamo intanto lo spinterometro in una cassetta e per mezzo di un buon obbiettivo *R* proiettiamo l'immagine ingrandita delle scintille sullo schermo *S* (fig. 17). Per mezzo di un altro obiettivo, *O*, proietteremo l'immagine della scintilla sulla fenditura spostabile *F* e per mezzo della lente *L* e del prisma *P* otterremo sullo schermo *M* l'immagine spettrale delle sue varie luci.

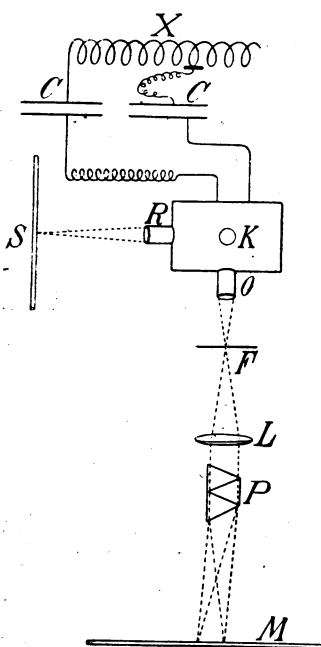



Fig. 17.

Quando il circuito è il più breve possibile, ossia è esclusa la spirale ed esso si riduce agli inevitabili fili di comunicazione, la scintilla è rumorosissima, brusca e si presenta come una striscia luminosa bianca, abbagliante più o meno irregolare, che congiunge gli elettrodi, ed è circondata da fiamme rosso-giallastre. Intorno agli elettrodi dove essa s'imposta si producono due piccole nubi luminose variamente colorate coi vari metalli (Tav. I, fig. 1).

L'immagine spettrale osservata in *M* mostra nella parte corrispondente alla scintilla bianca un ricco spettro di righe d'aria, nella parte corrispondente alle piccole nubi colorate intorno agli elettrodi lo spettro del metallo di cui questi son costituiti.

Tali nubi non son dunque altro che vapore metallico luminoso staccato dall'urto degli ioni sulla superficie degli elettrodi. Esse sono diversamente colorite nelle loro varie parti: nel caso, ad esempio, in cui gli elettrodi sono di magnesio, sono verdi all'esterno della scintilla e azzurre all'interno.

Nel loro spettro sono in questo caso forti le righe di alta eccitazione, caratteristiche appunto della scintilla. Per gli elettrodi ora usati si vede molto intensa la riga del magnesio 4481.

Se togliamo la fenditura *F* vediamo disegnarsi sullo schermo le immagini monocromatiche delle varie parti della scintilla; e vediamo nettamente divisi in due categorie i loro principali caratteri luminosi. Vediamo cioè che la striscia bianca che congiunge gli elettrodi (che noi chiameremo scintilla d'aria), emette le righe dei gas dell'aria, e le nubi di vapore danno luogo a due sorta di immagini: alcune piccole raccolte quasi nell'interno delle scintille d'aria, a contorni netti, che emettono righe di alta eccitazione, per la loro forma le chiameremo *ciuffi corti*; altre più estese lontano dagli elettrodi, a contorni indecisi che chiameremo *ciuffi lunghi* e che emettono le stesse luci che il vapore metallico può emettere nell'arco e nelle fiamme.

Con circuiti brevissimi le scintille d'aria hanno tale splendore da coprir quasi ogni altro aspetto luminoso, nel caso nostro sono particolarmente intensi (oltre alle immagini monocromatiche di quella) i ciuffi corti corrispondenti alla riga 4481 e quelli lunghi corrispondenti alle 5184-5173-5168.

Analizziamo ora il fenomeno con lo specchio rotante.

Anche un circuito così breve come quello ora usato presenta un'inerzia sufficiente per rendere la scarica oscillatoria; in questo caso il periodo è breve e notevole lo smorzamento.

La scintilla si risolve al solito in un tratto bianco abbagliante che congiunge gli elettrodi e che rapidamente va scomparendo per dar luogo ad una striscia rosso azzurrastra. Se lo specchio gira con sufficiente rapidità si può vedere che questo tratto bianco e questa larga striscia rosso azzurrastra non sono continue, ma costituite da una serie di tratti congiungenti gli elettrodi. Esse sono le immagini delle successive scintille d'aria.

Là dove queste si impostano sugli elettrodi, questi ultimi divengono notevolmente luminosi e molto più il negativo che il positivo. Poco al di sopra di questi punti partono e si allungano delle linee curve azzurre e verdi. Il loro colore ci rivela che sono disegnate dalle masse di vapore incandescente staccate dagli elettrodi e proiettate nell'intervallo di scarica.

Però tutto questo è visibile soltanto confusamente nelle immagini di scintille come quelle adesso ottenute con un circuito di scarica così breve: ciò è dovuto alla brevità del periodo di oscillazione, alla larghezza delle singole scintille d'aria componenti la scarica, alla larghezza e alla indecisione del getto di vapore luminoso lanciato ad ogni mezzo periodo. Per tutto questo nemmeno le fotografie possono in tal caso darci dei particolari netti.

Ritorniamo all'osservazione diretta della scintilla e guardiamo quello che succede quando si vada gradatamente aumentando l'autoinduzione del circuito. Vedremo subito che col crescere di questa diminuisce lo splendore e lo spessore del tratto bianco congiungente gli elettrodi, il quale finisce per diventare un sottilissimo filo circondato da una più larga e indecisa aureola rossastra. (Tav. I, fig. 2). Le nubi dei vapori metallici cambiano colore e figura, si allungano, prendono lo aspetto di nappe luminose, esse col magnesio sono azzurre vicino agli elettrodi, verdi, al solito, nelle parti restanti. Anche il rumore della scintilla si fa sempre meno vivo.

Ricorrendo poi allo specchio rotante vediamo con piccola autoinduzione che la scarica è avviata da una scintilla d'aria bianca congiungente gli elettrodi, alla quale possono tener dietro altre due o tre via via sempre meno luminose; a queste seguono poi numerose scintille rosse. (Tav. I, fig. 3 e 4).

Col crescere dell'autoinduzione le scintille d'aria bianche diminuiscono di numero, di larghezza di splendore e finiscono per ridursi ad una unica ed esilissima scintilla pilota che precede la prima scintilla d'aria rossa.

Le curve disegnate dai vapori metallici si allungano e si fanno sempre più regolari, sono al solito molto più lunghe e luminose al negativo che al positivo.

Corrispondentemente l'esame allo spettroscopio della luce emessa da queste scintille ci fa vedere che col crescere dell'autoinduzione lo spettro di righe dell'aria va continuamente indebolendosi e compare in sua vece lo spettro di bande, mentre nello spettro metallico vanno aumentando le righe di bassa eccitazione e diminuendo quelle di alta eccitazione.

Se poi facciamo in *M* l'esame delle immagini monocromatiche delle scintille d'aria e dei vapori metallici vediamo subito che col

crescere dell'inerzia del circuito mentre i ciuffi lunghi corrispondenti alle righe di bassa eccitazione si allungano e si accrescono conservando i loro contorni indecisi, quelli brevi si raccorciano e si fanno sempre più netti.

§ 7. — *Teoria dell'emissione della luce nella scintilla.* — Vediamo adesso se sulla guida di ciò che abbiamo prima riferito e di quanto abbiamo ora visto riusciamo a renderci conto almeno in parte dell'andamento complicato di questo fenomeno.

Riepiloghiamo brevemente i fatti: la scarica si inizia con un processo esplosivo nell'aria che dà luogo alla *pilota*.

A questa scintilla pilota seguono altre scintille d'aria, le prime delle quali possono emettere uno spettro di righe d'aria, ma che finiscono sempre per emettere uno spettro di bande.

Dalla scarica vengono lanciati nello spazio circostante dei vapori metallici: questi sono diversamente luminosi nelle diverse regioni della scintilla che attraversano, in vicinanza degli elettrodi e specialmente del negativo emettono righe di alta eccitazione, nelle altre parti righe di eccitazioni più basse. Si può dire che divengono luminosi nell'attraversare la scintilla e le fiamme che la circondano.

L'avviarsi della scintilla con quel rapido processo d'ionizzazione che noi abbiamo visto, con un consumo d'energia per istante e per unità di volume relativamente enorme, dà luogo alla formazione della pilota. Questa libera un gran numero di ioni e innalza l'aria circostante ad una elevatissima temperatura.

Dal condensatore intanto attraverso al circuito affluiscono agli elettrodi le cariche elettriche: se la quantità di elettricità che arriva a questi è sufficiente per mantenere ancora una differenza di potenziale elevata, e quindi un campo sufficientemente intenso, allora il processo di ionizzazione per urto eseguito dagli ioni positivi e negativi si mantiene ancora su tutta la lunghezza della scintilla d'aria e manifesta il suo indice luminoso nello spettro di righe.

Ma intanto si è riscaldato un volume notevole di gas tra gli elettrodi ad una temperatura elevatissima, la vivissima agitazione atomica e molecolare a questa così alta temperatura facilita la ionizzazione e diminuisce il numero delle ricombinazioni, la rarefazione a cui è portato il gas aumenta il percorso libero degli ioni, per tutte queste cause insieme la ionizzazione si produce con un

campo molto più debole. L'accumularsi vicino agli elettrodi di ioni di segno opposto al loro fa sì che in vicinanza di essi esistano due regioni in cui il campo è molto più intenso, mentre nella maggior parte della lunghezza della scintilla il campo è debole. In queste due regioni appunto e sopra tutto in quella dove si accumulano gli ioni positivi, cioè al negativo, si mantiene l'ionizzazione per urto, ed è appunto in queste regioni che si mantiene l'indice luminoso di questo fenomeno e compariscono le righe di alta eccitazione dello spettro metallico della scintilla. La loro presenza par dunque legata all'azione degli ioni positivi.

§ 8. — *Coesione delle scintille d'aria.* — La massima parte degli ioni si formano dunque in queste due regioni e sopra tutto al negativo emigrano poi attraverso alla colonna di gas caldissimo, che disegna alla meglio l'andamento delle linee di forza e che per la sua rarefazione lascia ad essi più libero il cammino. Questa colonna è fatta di ioni di opposto segno ed ha necessariamente, per questo e per avere una certa differenza di potenziale fra strato e strato, coesione e contrattilità.

Coesione e contrattilità che noi possiamo mostrare senz'altro con una semplicissima esperienza.

Gettiamo un veloce getto d'aria nello spazio fra gli elettrodi e facciamo scoccare fra questi una scarica di lento periodo. Vedremo subito che questa si scompone in una serie di scintille di aria, via via sempre più spostate e deformate dal soffio, e scorrenti sugli elettrodi. Il loro comportamento è quello di una fune flessibile e contrattile che venga così investita e deformata dal soffio. (Tav. I, fig. 5).

I vapori metallici non seguono in generale l'andamento delle scintille d'aria ma sono semplicemente trascinati lontano dagli elettrodi dalla violenza del getto.

Si può approfittare anche come ha fatto l'Hemsalech, di questa proprietà delle scintille per misurarne e confrontarne il periodo di oscillazione. Sostituiamo alle sferette dello spinterometro due lastrine disposte nel piano verticale che passa per l'asse delle bacchette dello spinterometro stesso. Disponiamo gli orli di queste lastrine in modo che siano di poco inclinati fra loro, cioè un po' più vicini in basso, un po' più distanti in alto. Per assicurarci che la scarica cominci sem-

pre dal basso possiamo ivi mettere due puntine metalliche. Se ora, mentre scocca la scintilla, mandiamo un veloce getto d'aria nello spazio fra gli orli delle due lastrine vedremo separati bene i vari caratteri della scintilla e cioè, la pilota immobile, le successive scintille d'aria curvate e spostate l'una rispetto all'altra e via via sempre più lontane dalla pilota, i vapori metallici lanciati e trascinati in qua e in là.

Conoscendo la velocità del soffio si può con una certa approssimazione servirsi di questa disposizione per una misura del periodo.

Concludendo la prima scintilla o scintilla pilota con gli ioni che libera dà il materiale perchè si possa formare un conduttore gassoso fra gli elettrodi.

Questa pilota è dunque la vera scintilla.

Il fenomeno che la segue ha un andamento ben diverso, si va via via sempre più avvicinandosi ad un altro processo, a quello cioè dell'*arco voltaico.*

La scarica di un condensatore comprende tutti e due questi fatti: comincia sempre con un fenomeno esplosivo che dà luogo alla pilota, può finire in un *arco voltaico* vero e proprio.

§ 9. — *L'arco, suo adescamento.* — L'arco elettrico si presenta come un conduttore gassoso impostato fra gli elettrodi roventi, che si mantiene lungamente, con piccole differenze di potenziale fra gli elettrodi stessi e non presenta alcuno di quei fenomeni esplosivi che accompagnano sempre la scintilla.

Vogliamo adesso vedere come è costituito, come si mantiene ed alcuni dei suoi caratteri essenziali.

I fisici che si sono occupati dell'arco elettrico sono numerosissimi, e numerosissimi e importanti sono i lavori che trattano di questo argomento e una spiegazione soddisfacente del modo di stabilirsi e di mantenersi dell'arco è stata data a parer mio in questi ultimi tempi dall'Occhialini [1].

Riferirò appunto alcune delle sue esperienze e delle sue conclusioni.

Intanto il modo comune di stabilire un arco è, come tutti sanno, quello così detto di *corto circuito* che consiste nel mettere a contatto

---

[1] N. C. serie V, vol. 18, pag. 63; 1907.

gli elettrodi (supponiamo di carbone) e allontanarli ad istanza conveniente. Ciò facendo stabiliamo dapprima il passaggio di una corrente intensa fra i carboni, nell'allentare poi il loro contatto si rende grande la resistenza del contatto stesso e si arroventano così le superfici esterne degli elettrodi, staccandoli si stabilisce tra di loro la scintilla di apertura.

Ci possiamo fare la domanda se l'ionizzazione del mezzo interposto tra i carboni basta a staccare l'arco. L'esperienza ci dimostrerà subito che non è sufficiente. Si avvicinino due carboni alla distanza di due o tre millimetri e si mettano in comunicazione con la corrente di città inserendo al solito un reostato. Si uniscano ai due carboni le due armature esterne dei due condensatori di una buona macchina ad induzione, vedremo che ad ogni scintilla fra gli elettrodi ne scocca una anche fra i ca·boni e che una sola scintilla non basta in generale ad accendere l'arco. Occorre una scarica assai nutrita. In questo caso però viene il dubbio che l'arco si sia acceso non soltanto per la ionizzazione della scintilla, ma anche per l'arroventamento dei carboni da questa provocato. E questo dubbio viene subito confermato se si ripete qualcuna delle esperienze dell'Occhialini.

Si dispongano tre carboni come mostra la fig. 18; riuniamo due di questi carboni *A* e *B* tra loro e con uno dei fili della corrente stradale; l'altro carbone *G* colleghiamolo con l'altro filo. Interponiamo un commutatore e un reostato. Accendiamo l'arco in modo che si stabilisca fra i due carboni verticali *A* e *C*, se il carbone solo *C* è positivo e allontaniamo l'altro carbone *A* che gli sta di contro, l'arco si spegne sempre, se il carbone *C* è il negativo l'arco si attacca invece al carbone orizzontale *B*. Ciò è in contraddizione con l'ipotesi che la ionizzazione dell'aria basti a stabilire l'arco, in questo caso infatti nulla dovrebbe importare il segno dei carboni. Questa esperienza dimostra che l'arroventamento di questi ha una grande importanza nel fenomeno e che *per l'esistenza dell'arco è necessario l'arroventamento del catodo.*

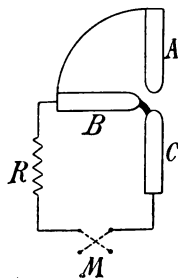



Fig. 18.

Ciò viene confermato anche da quest'altra esperienza: avviciniamo due carboni a pochi millimetri di distanza e colleghiamoli

ad una conduttura a 220 volta. Se con una fiamma alimentata con ossigeno arroventiamo la punta del negativo l'arco si stacca, non si stacca se arroventiamo il positivo.

Ecco che cosa accade: una volta arroventato il catodo, questo, come è noto ormai da moltissimi fatti accertati, per la temperatura elevata a cui è portato emette con abbondanza elettroni, che sotto le forze del campo si muoveranno verso l'elettrodo positivo. Ma gli elettroni nel loro percorso operano anche delle dissociazioni, cosí che gli ioni positivi, che si portano al negativo e cedono ad esso la loro forza viva, se saranno abbastanza numerosi finiranno per conservarlo rovente e il processo si manterrà senza bisogno di altre sorgenti ausiliarie di calore.

Il Villard fotografando su di una lastrina mobile rapidamente un arco alternato osservò che la luce incomincia a manifestarsi all'elettrodo positivo e poi si propaga verso il negativo: da questa osservazione dedusse che la scarica nell'arco si propaga dal positivo al negativo. Questa deduzione non apparisce giustificata. Tali fatti luminosi possono benissimo manifestarsi quando già la scarica è stabilita. Le esperienze precedenti mostrano in modo indiscutibile che l'arco è iniziato dal getto di ioni negativi da parte del catodo rovente: ora immaginiamo un catodo rovente e di fronte a questo un anodo freddo; soltanto dal catodo usciranno gli elettroni e sollecitati dal campo elettrico si muoveranno nello spazio compreso fra gli elettrodi. Inizialmente questo sarà dunque tutto pieno di corpuscoli negativi, ciò porta come conseguenza che l'intensità del campo dovrà andare crescendo a partire dal catodo verso l'anodo e sarà massima in immediata vicinanza di questo. Là potrà aversi allora ionizzazione per urto e là per conseguenza dovranno iniziarsi i fenomeni luminosi i quali poi si propagheranno verso il catodo, camminando in senso inverso a quello in cui si son mossi gli elettroni per avviare la scarica.

L'adescamento dell'arco ottenuto con un preventivo arroventamento del catodo si può dunque rassomigliare a un corto circuito: infatti gli ioni negativi che uscendo dal catodo caldo vanno a occupare nella fase preparatoria dell'arco lo spazio fra gli elettrodi, costituiscono quasi un prolungamento del catodo stesso, ciò che ha per effetto di portare quest'ultimo a contatto dell'anodo.

§ 10. — *L'arco nel campo magnetico.* — Questo modo di stabilirsi dell'arco dà luogo a un comportamento nel campo magnetico che ha qualche analogia con quello della scintilla, come possiamo subito arguire da alcune osservazioni.

Se facciamo agire un campo molto intenso sopra una scintilla di lento periodo la pilota non resta affatto deviata, ma le successive scintille di aria vengono spostate e piegate a mezza circonferenza da una parte e dall'altra degli elettrodi. Se facciamo agire il campo sopra un arco, questo, come è noto, si piega in cerchio allungandosi tanto che se il campo è assai intenso si spegne.

Disponendo come ha fatto l'Occhialini, un arco periodicamente interrotto in presenza di un campo magnetico e combinando le cose in modo che per mezzo di un opportuno stroboscopio si possa osservare l'arco proprio nella fase in cui si inizia, si nota che in questa fase iniziale esso non è affatto deviato dal campo magnetico.

Ciò che del resto viene mostrato all'evidenza da una fotografia dell'Occhialini. Essa rappresenta due archi contemporanei, tutti due posti in uno stesso campo magnetico e scoccanti fra un elettrodo negativo appuntito e un elettrodo positivo piano e perpendicolare al negativo. Il primo arco grandemente deviato e allungato è prossimo a spengersi, e per le sue condizioni ha determinato un innalzamento alla differenza di potenziale fra gli elettrodi. Essendo rovente il catodo si è per questo spontaneamente staccato l'arco più corto, colto nella fotografia nel momento della sua formazione. Esso è simile a una scintilla improvvisamente scoccata fra i due elettrodi e non è mosso dal campo magnetico.

Di tutto ciò l'Occhialini (l. c.) ha chiaramente mostrato la ragione.

Quando la colonna luminosa dell'arco o della scintilla è stabilita essa è formata da ioni di segno opposto, che esercitano tra loro delle azioni attrattive; in tali condizioni le azioni esercitate dal campo su ciascun ione si trasmettono agli altri per mezzo dei loro reciproci legami. La colonna in altre parole non può comportarsi diversamente da un qualunque conduttore flessibile percorso da corrente.

Ma nella fase iniziale, quando solo gli ioni negativi sono nel campo, questi legami fra i vari ioni non esistono, e ciascuno di essi si muove senza tirarsi dietro gli altri. Ciascun ione se fosse

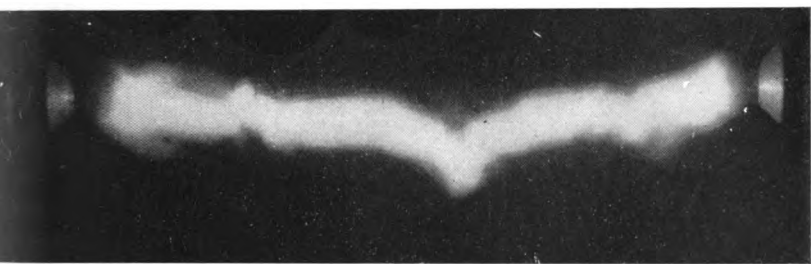



Fig. 1.

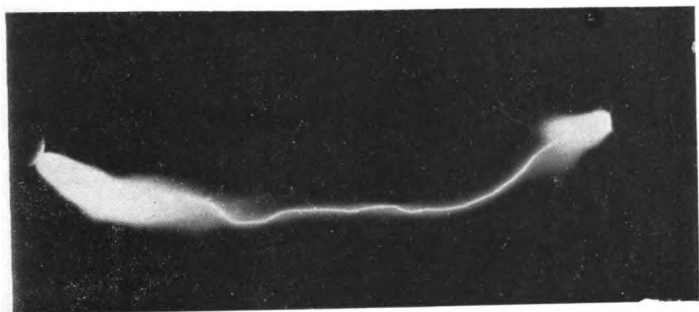



Fig. 2.

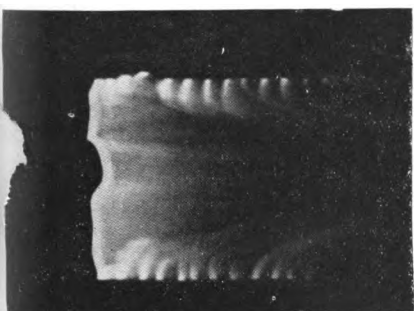



Fig. 3.

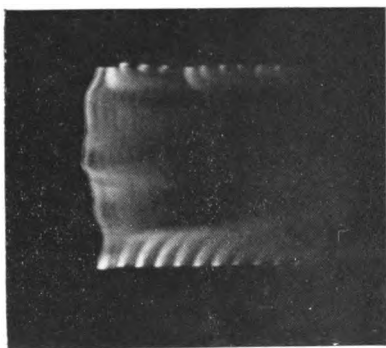



Fig. 4.

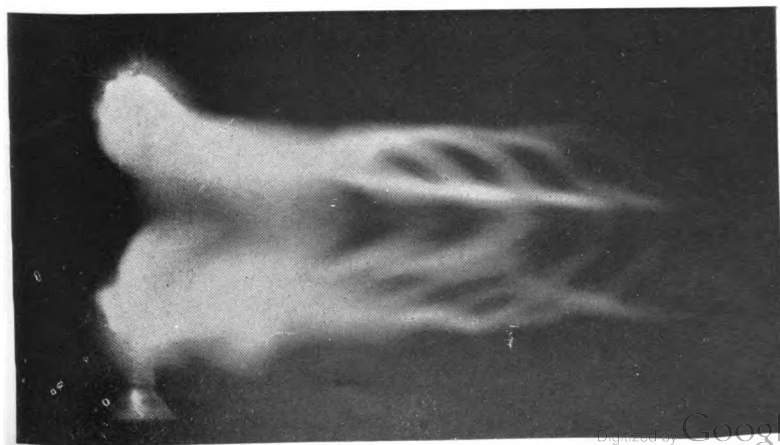



Fig. 5.

libero di muoversi nel campo magnetico, sotto l'azione di questo e del campo elettrico, andrebbe dall'uno all'altro carbone descrivendo una cicloide. Ma dati gli urti frequenti con le molecole del gas e dato il breve percorso libero degli ioni è facile dimostrare con un calcolo semplicissimo che essi non potranno venire sensibilmente deviati dalla loro strada che è quella determinata dalle linee di forza elettriche.

§ 11. — *Aderenza dell'arco al catodo.* — L'esperienza ci ha mostrato che l'arco ha una certa contrattilità e una certa coesione nella sua colonna gassosa e ci mostra anche che esso ha una certa aderenza agli elettrodi, non eguale al catodo e all'anodo, ma sempre sensibile.

Ciò può mostrarsi molto chiaramente con la seguente disposizione.

Si faccia scoccare l'arco fra un carbone cilindrico *A* (fig. 19) e un carbone *B* tagliato a forma di disco e girevole intorno all'asse *O*. Se *B* è positivo ed *A* è negativo e se facciamo rotare il disco *B* anche con una discreta velocità notiamo che l'arco si allunga un poco, ma si mantiene acceso. Ha dunque una debole aderenza al positivo tanto che questo muovendosi può trascinarlo e allungarlo un poco, ma, se la velocità del disco non è eccessiva, non è sufficiente a determinarne la rottura.

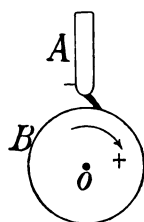



Fig. 19.

Se invertiamo invece le comunicazioni, anche se muoviamo lentamente il disco, l'arco viene sempre trascinato da questo nel suo movimento, fino a che appena abbia raggiunto una certa lunghezza si spegne. L'aderenza che era debole al positivo è invece molto forte al negativo.

Questa aderenza agli elettrodi dimostra una volta di più che i centri elettrizzati non hanno tutti origine nel mezzo posto fra gli elettrodi, poichè se così fosse, muovendosi gli elettrodi in modo da non alterare il campo, nulla dovrebbe variare nell'andamento dell'arco. La cosa non è così, dunque le regioni in cui si imposta la colonna luminosa emettono ioni esse stesse, e l'emissione c'è tanto al catodo che all'anodo. È essenziale però per la permanenza dell'arco una abbondante emissione catodica.

§ 12. — *Conclusione.* — La scintilla si stabilisce quando il campo fra gli elettrodi abbia raggiunto un valore così elevato che la ioniz-

zazione per urto possa avvenire per parte di tutte e due le specie di ioni lungo tutta o quasi tutta una linea congiungente gli elettrodi. Raggiunto questo valore del campo così elevato la ionizzazione procede così rapida e così abbondante da dar luogo ai fatti esplosivi a tutti noti. Nello stabilirsi della scintilla è il campo quello che crea gli ioni necessari all'andamento del fenomeno.

L'arco si stabilisce invece con campi deboli in quasi tutto lo spazio fra gli elettrodi, ma la condizione necessaria al suo staccarsi e al suo mantenimento è che il catodo sia rovente tanto da emettere elettroni in gran numero.

Dopo che si è stabilita la scintilla o avviato l'arco le cose possono procedere in modo molto diverso a seconda delle circostanze, ma, nell'arco sempre, e spesso nella scintilla, si forma una colonna conduttrice, luminosa, caldissima ricchissima di ioni di tutte e due le specie e per questo dotata di coesione e contrattilità.

Lungo tutta questa colonna il campo è in generale debole: ma vi sono regioni in vicinanza degli elettrodi, nelle quali può essere assai intenso.

Se in queste regioni è viva la ionizzazione per urto si nota allora in esse la produzione di notevoli fenomeni luminosi, ricchi di quelle radiazioni che danno luogo agli spettri di più alta eccitazione.

LUIGI ROLLA

I COLLOIDI

§ 1. — *Sistemi eterogenei dispersi.* — Dopochè, nel 1861, apparve il lavoro di Graham su la « *Liquid diffusion applied to analysis* » la chimica dei colloidi cominciò a svilupparsi, e, in meno di mezzo secolo si accumulò, per opera di fisici, chimici e biologi una quantità enorme di fatti e di teorie. La parola stessa « *colloide* » assunse a poco a poco un significato che non è possibile afferrare senza il sussidio delle teorie generali della moderna fisico-chimica.

Il risultato fondamentale delle ricerche eseguite coi metodi fisici e sopratutto coll'ultramicroscopio si può riassumere affermando che i colloidi sono *sistemi eterogenei.* Infatti è possibile separare da essi, per via puramente meccanica, le parti *fisicamente omogenee* che li costituiscono allo stesso modo come da una sospensione di sabbia fine nell'acqua è possibile separare il corpo solido dal liquido. I mezzi fisicamente omogenei dei quali consta un sistema eterogeneo sono caratterizzati dal fatto che in ogni loro parte conservano completamente le loro proprietà, e si chiamano, secondo la denominazione di Gibbs, *fasi.* Si potrà dunque dire che i sistemi colloidali sono sistemi costituiti da più fasi. Ma i fenomeni che si osservano facilmente fanno concludere che i colloidi hanno delle caratteristiche fondamentali che li distinguono dagli altri sistemi eterogenei e li avvicinano gradamente alle soluzioni che, secondo la definizione, devono essere trattate come sistemi omogenei. Anzitutto, nei sistemi colloidi la superficie di separazione delle fasi è enormemente grande, perchè essi sono costituiti in modo che in pochi centimetri cubici sono sparsi milioni e milioni di particelle solide o liquide le cui dimensioni lineari sono dell'ordine del milionesimo di millimetro, in modo che, macroscopicamente, il sistema appare omogeneo. Dunque si deve distinguere una *fase dispersa* da un'altra che rappresenta il *mezzo dispersivo,* allo stesso modo come nelle sospensioni o nelle emulsioni

si distinguono le particelle dal liquido nel quale sono sospese, e nelle soluzioni, il solvente dal soluto.

E le ricerche recenti fanno vedere come sia possibile concepire il colloide come termine di passaggio tra la sospensione e la soluzione e come sia possibile fondare una classificazione sul *grado di dispersione* a cui si trova la fase sospesa.

Così si possono classificare tra le emulsioni o tra le sospensioni i sistemi la cui fase dispersa è costituita da particelle di dimensioni lineari non più piccole di 0,1 millesimo di millimetro; tra i colloidi quelli in cui le particelle raggiungono diametri compresi tra 0,1 μ e 1 $\mu\mu$, e finalmente fra le soluzioni i sistemi contenenti una fase maggiormente suddivisa.

E una classificazione siffatta ha un appoggio sperimentale sopratutto in esperienze recentissime di Svedberg, le quali, mentre tendono a dimostrare l'esistenza effettiva delle molecole, fanno vedere il passaggio graduale tra il sistema colloide e la soluzione, almeno nei fenomeni di assorbimento della luce. D'altro lato le esperienze di Coehn riescono a dimostrare, in certi casi particolari, l'eterogeneità delle soluzioni.

§ 2. — *Sospensoidi e emulsoidi.* — Non bisogna dissimularsi però che il passaggio tra l'emulsione o la sospensione e il colloide non è continuo, perché nelle proprietà generali dei sistemi dispersi, quando il diametro delle particelle raggiunge un valore di 0,1 millesimo di millimetro per diminuire, si ha una discontinuità. D'altra parte ognuno vede che una classificazione dei colloidi fondata solo sul criterio del grado di dispersione della fase sospesa, ossia sulla grandezza dei granuli non è sufficiente per caratterizzare questa grande classe di sostanze. Infatti sistemi ugualmente dispersi possono avere proprietà differenti, e, per esempio, una sospensione di quarzo in acqua e un'emulsione di olio possono contenere delle particelle di uguali dimensioni. Così diventa ovvia una classificazione fondata sulla natura, ossia sullo stato di aggregazione della fase dispersa.

Consideriamo adunque le sospensioni e le emulsioni. Nel primo caso abbiamo una fase liquida come mezzo disperdente e una fase solida dispersa, nel secondo, ambedue sono liquide. Aumentando la suddivisione della fase dispersa noi possiamo arrivare alle dimensioni

caratteristiche per le particelle colloidali, ma nel primo caso avremo dei *sospensoidi*, nell'altro, degli *emulsoidi.*

Una delle ricerche più importanti che suggerisce questa classificazione è quella dei termini di passaggio. Come vi sono degli stati intermedî tra quello liquido e quello solido, così devono esistere sistemi intermedî tra gli emulsoidi e i sospensoidi. Per le emulsioni e le sospensioni ciò si verifica. Per esempio, alcune gocce di colofonio dànno, con molta acqua, una sospensione o un'emulsione a seconda della temperatura.

Le due grandi classi in cui si possono dividere i sistemi colloidali sono ben distinte: alla prima (sospensoidi) appartengono, per esempio, i metalli in quello stato di grande suddivisione che si raggiunge adoprandoli come elettrodi in un arco elettrico fatto brillar sotto l'acqua distillata, e all'altra (emulsoidi) la gelatina, l'agar, il bianco d'ovo.

La proprietà di lasciar deporre con una relativa facilità la fase sospesa fa definire i colloidi della prima classe come « colloidi instabili ». Essi non sono viscosi, non gelatinizzano, e presentano tutte quelle caratteristiche che li fanno avvicinare alle sospensioni. Gli altri sono « stabili », viscosi e perciò gelatinizzano. Le loro proprietà li riavvicinano alle emulsioni.

Esistono sospensoidi ed emulsoidi organici e inorganici; però mentre i primi si ottengono con opportuni e svariati metodi in laboratorio, i secondi (e precisamente quelli organici) sono prodotti naturali. Si deve ritenere che a meno che non vi siano azioni chimiche secondarie fra mezzo dispersivo e fase dispersa, è sempre possibile la formazione di un colloide, qualunque ne sia la costituzione chimica.

Le condizioni sperimentali nelle quali noi dovremo metterci per raggiungere, per le varie sostanze, lo stato colloidale, saranno diverse a seconda dei casi, ma essenzialmente si dovranno seguire due vie: o favorire la suddivisione dei grossi granuli di una sospensione, o diminuire il potere dispersivo del mezzo, passando dalla soluzione al colloide. Il primo metodo si chiama metodo di *dispersione*, l'altro di *condensazione*.

§ 3. — *Preparazione dei sospensoidi.* — Consideriamo i sospensoidi.

E' possibile ottenere, seguendo dei *metodi meccanici* di disper-

sione dei metalli e delle sostanze oganiche allo stato colloidale: per esempio bollendo dei frammenti di argento, in recipienti di argento con acqua purissima si ha l'argento colloidale, e agitando fortemente della polvere d'indaco con acqua si arriva non difficilmente ad una sospensione così fine che è stabile per un tempo lunghissimo.

Ma di gran lunga più importanti e più generali sono i *metodi chimici* di dispersione e di condensazione.

Per i primi, un esempio è dato dall' idrato ferrico. Quando questo, già allo stato colloidale, venga disseccato, e poi trattato con poco acido cloridrico diluito, ritorna allo stato d'*idrosolo.*

Analogo comportamento hanno anche l'acido stannico e l'ossido di torio.

I metodi chimici di condensazione sono specialmente fondati sulla riduzione, l'idrolisi e la doppia decomposizione.

La riduzione si opera in generale per ottenere gli idrosoli metallici, e l'esempio classico è dato dall'oro. Il cloruro d'oro ha una grande attitudine a venir ridotto anche dai riducenti deboli, e, in soluzione molto diluita, si presta molto bene per la preparazione di sospensoidi che, per le loro proprietà possono essere studiati con profitto ed interesse da molti punti di vista, e specialmente da quello ottico. Basta aggiungere ad una soluzione contenente 0,013 di cloruro d'oro in 150 centimetri cubici di acqua distillata purissima, 3 o 4 centimetri cubici di soluzione $N/18$ di carbonato potassico puro, e poi, all'ebollizione, quattro centimetri cubici di soluzione diluita di formaldeide (3 cc. di formolo del commercio in 100 di acqua), perchè si formi tosto un liquido vivamente colorato in rosso. Questo è l'idrosolo di oro, il quale può assumere anche altre tinte, per esempio, la bleu o la violetta, a seconda delle circostanze in cui viene preparato. E risulta immediatamente dalla pratica che bastano le impurezze contenute nell'acqua distillata ordinaria, per ottenere, anzichè l'oro rosso, quello violetto. Altri riduttori convengono ugualmente bene per la preparazione di questi idrosoli, per esempio l' idrazina. La glicerina sola e in soluzione agisce pure nello stesso modo, e, a seconda delle proporzioni che si prendono rispettivamente di cloruro d'oro o di sale neutralizzante, si hanno delle varie gradazioni nel colore, passando dal rosso-violetto, al bleu (assenza di $K_2\ CO_3$).

Argento, mercurio, platino, sodio, palladio ed osmio si ottengono allo stato d'idrosolo modificando opportunamente, caso per caso, il metodo seguito per l'oro: il colore che assumono è in generale scuro od olivastro.

Quanto ai processi di idrolisi, ossia fondati sopra la decomposizione che subisce un sale per opera degli elementi dell'acqua, essi sono particolarmente indicati quando si vogliono ottenere idrosoli di idrati metallici.

L'esempio classico è dato dall'idrato ferrico. Scaldando una soluzione di cloruro di ferro, essa s'idrolizza e diventa rossastra non appena il colloide si sia formato. Il metodo si applica specialmente bene ai sali di certi acidi organici per i quali l'idrolisi è facile.

La doppia decomposizione poi costituisce un metodo generale per la preparazione dei solfuri, ferrocianuri, ecc. Se si aggiunge goccia a goccia a una soluzione diluita di ferrocianuro di potassio del solfato di rame pure diluito, si ha un liquido di un colore rosso cupo che costituisce l'idrosolo di ferrocianuro di rame. E una soluzione di idrogeno solforato su quella di anidride arseniosa agisce dando l'idrosolo giallo di solfuro di arsenico.

Questi metodi chimici richiedono poi l'uso del dializzatore per poter depurare i *colloidi* dai *cristalloidi* che sono pure presenti nel liquido in cui avvengono le diverse reazioni.

La vecchia definizione di Graham non perde il suo valore: colloide era per lui ciò che non poteva diffondere attraverso le membrane animali, e il mezzo più sicuro di purificazione per i *soli* è sempre quello di operarne la dialisi.

Rimane da ricordare i metodi elettrici di preparazione dei sospensoidi. Si utilizza l'arco voltaico e la scintilla, e mentre che il primo permette di preparare solo idrosoli, per mezzo dell'altra si possono avere *alcol-*, *etero-*, *glicero-soli.*

L'arco elettrico si fa brillare fra due fili di metallo, per esempio, platino, oro o argento, sotto l'acqua distillata, e il catodo si disgrega in tenuissime particelle che rimangono sospese dando al liquido la tinta caratteristica dell'idrosolo corrispondente.

La scintilla tra elettrodi costituiti dal metallo di cui si vuol ottenere il *solo* può scoccare sotto un liquido appartenente ai composti del carbonio, senza decomporlo: s'inserisce tra il rocchetto e lo

spinterometro una capacità, e si riesce in breve tempo a suddividere in particelle tenuissime dei metalli che, altrimenti, non potrebbero essere ottenuti allo stato colloidale. Per esempio, i metalli alcalini reagiscono energicamente coll'acqua, ma non con certi liquidi organici ai quali communicano, allo stato di grande divisione dei colori vivacissimi che sono del tutto simili a quelli dei loro vapori.

§ 4. — *Ultramicroscopia.* — Questi liquidi, come quelli ottenuti per via chimica, presentano a prima vista un fenomeno che li distingue nettamente dalle soluzioni vere.

Se noi mandiamo un raggio di luce attraverso ad essi, ne osserviamo, ponendoci lateralmente, la trajettoria [fenomeno di Tyndall]. Su questa semplice esperienza è fondato sostanzialmente il metodo di osservazione ultramicroscopica, allo sviluppo del quale si debbono i progressi delle interessanti ricerche sull'ottica dei dispersoidi.

S'illumina molto intensamente un sottile strato di liquido, e le particelle che vi sono sospese, piccole in confronto della lunghezza d'onda della luce incidente, dànno delle imagini di diffrazione che si possono osservare con un microscopio. Il metodo applicabile non appena i granuli della fase dispersa sono così piccoli da non poter essere più nè misurati, nè visti coi maggiori ingrandimenti, dà buoni risultati finchè le loro dimensioni si mantengono superiori a 6 milionesimi di millimetro, e l'apparecchio, ideato da Siedentopf e Zsigmondy, è assai semplice (fig. 20).

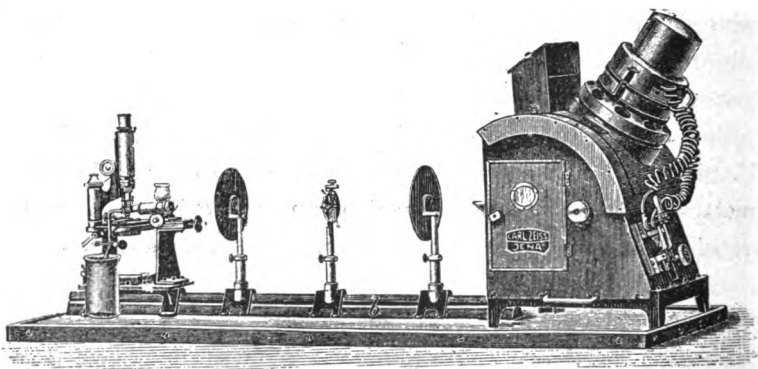



Fig. 20.

I raggi di una lampada ad arco cadono sopra una lente nel fuoco della quale si trova un diaframma con una fenditura regola-

bile. Mediante un altra lente si porta l'imagine di questa fenditura ad una distanza conveniente da un obbiettivo da microscopio, e così rimpicciolita, essa entra in una vaschetta che si trova sotto al microscopio. Questa ha il fondo scuro e pure scuro è il lato opposto a quello dove penetra la luce, ed è munita di un imbuto e di un tubo di efflusso per potervi versare il colloide.

Un altro sistema più semplice è dovuto ai francesi *Cotton* e *Mouton*. Si fa riflettere totalmente un raggio di luce, che arrivi sotto un angolo maggiore dell'angolo limite, dalla faccia superiore del copri-oggetti di una preparazione ordinaria microscopica. In tal modo la luce che si percepisce coll'oculare non è altro che quella diffusa dalle particelle, e così se ne vedono le imagini di diffrazione. L'apparecchio che si adatta molto bene a questo scopo è un *condensatore parabolico* nel quale il cammino seguito dai raggi è rappresentato schematicamente dalla figura 21. Il *condensatore* si addatta con una vite sotto al microscopio, e come sorgente luminosa si adopera una lampada Nernst oppure ad arco, avendo cura di porre sul cammino dei raggi

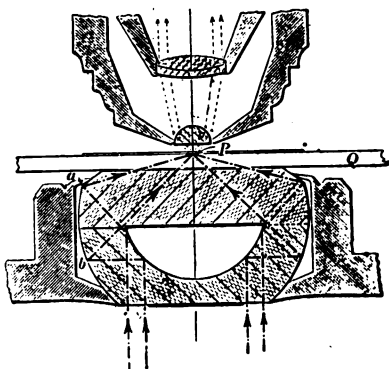



Fig. 21.

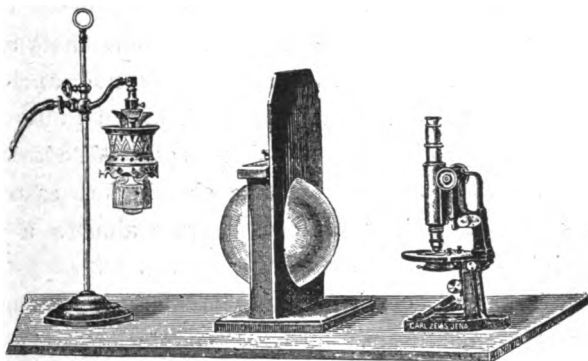



Fig. 22

una boccia di acqua per impedire il riscaldamento della preparazione (fig. 22).

In seguito alla rifrazione sulla superficie dei granuli, si ha dunque una deformazione della superficie d'onda, e quindi tutti i fenomeni di diffrazione che si osservano coll' ultramicroscopio. Si formano degli anelli che vanno man mano restringendosi avvicinando l' obbiettivo alle particelle, e queste, vengono a spiccare, quando sono a fuoco, sul fondo scuro come tante stellette brillanti.

Queste sono animate da un movimento irregolare, per cui si vede un formicolio luminoso di impareggiabile bellezza.

Il problema della determinazione della loro grandezza può essere risoluto, almeno in modo approssimativo, contandole o misurando la distanza media che intercede fra loro. Questo metodo però presuppone naturalmente che si realizzino delle condizioni sulle quali regna la più grande incertezza.

Intanto non si può essere certi di poter contare tutti i granuli contenuti in un dato volume di colloide, per quanto si operi a diluizioni differenti e si ripetano molte volte le misure, e non si è autorizzati a ritenere che il loro diametro, anche per un colloide di colore ben definito, si mantenga costante.

E poi, quale forma ascrivere ai granuli colloidali? Esperienze svariate e coscienziose stanno a dimostrare che ad essi non si può ascrivere, in moltissimi casi, la forma sferica e tanto meno quella cubica per la quale, in prima approssimazione, si calcolano le dimensioni lineari.

La luce colla quale si fanno le esperienze ha una grande influenza sui resultati. Il numero dei *submicroni* ossia dei granuli visibili è, dentro certi limiti, addirittura proporzionale all'intensità luminosa del fascio incidente; ma spesso è grande, anche operando coi raggi solari, il numero degli *amicroni*, la cui presenza si svela soltanto con una striscia biancastra, una specie di via lattea della costellazione ultramicroscopica. È vero che in tal caso esiste un metodo ingegnoso di Zsigmondy per arrivare almeno a dei valori approssimativi nella valutazione del diametro.

Quando i granuli sono così fini, che sfuggono all'osservazione ultramicroscopica, basta aggiungere al colloide qualche goccia di un altro colloide ricco di submicroni, perchè gli amicroni del primo crescano tanto da poter essere veduti e contati. Questa « semina » fa ricordare l'aggiunta di un germe cristallino per rompere il falso equilibrio delle soluzioni soprasature.

Imaginiamo dunque di voler contare il numero dei granuli contenuti nell'unità di volume di un idrosolo. Bisognerà dapprima misurare, col micrometro oculare, le dimensioni del fascio luminoso che entra nella vaschetta, e limitarne una parte dentro la quale si fa la determinazione. Per far ciò si pone il micrometro perpendicolare alla direzione dei raggi, e si fa una prima lettura tenendo la fenditura coll'asse maggiore parallelo al tubo del microscopio, e così si ha l'altezza. Poi si gira la fenditura di 90 gradi e si misura la larghezza del cono luminoso. Facendo rotare di 90 gradi il micrometro si limita la lunghezza della zona, dove si contano i granuli dopo aver diluito sufficientemente. Si sappia per esempio, quanti di essi sono in un millimetro cubo di liquido. Conoscendo il peso complessivo della sostanza allo stato colloidale e il suo peso specifico sarà facile calcolare il volume di ciascuna particella, supposta cubica o sferica, e da questo il diametro.

In tal modo si ottengono pei submicroni dei valori dell'ordine del milionesimo di millimetro, e si può ritenere che, dati i nostri mezzi d'illuminazione, un granulo il cui diametro è inferiore a sei milionesimi di millimetro sia un amicrone.

Naturalmente il metodo suppone la conoscenza della composizione chimica dei granuli e questa, nella maggior parte dei casi, è tutt'altro che chiarita. Già per i colloidi preparati col metodo elettrico vi sono ragioni per ritenere che nei granuli sia contenuto dell'ossigeno allo stato di combinazione col metallo suddiviso. Infatti, la temperatura elevatissima dell'arco dissocia l'acqua, e l'analisi spettroscopica svela, nella luce emessa, la riga dell'idrogeno.

§ 5. — *Fenomeni di assorbimento.* — È certo del resto che la composizione chimica dei sospensoidi preparati coi vari metodi di condensazione e di dispersione è molto variabile e che non si tratta, nella maggior parte dei casi, di individui chimici definiti. Qui entrano in giuoco dei fenomeni di assorbimento la cui importanza è assai più grande di quanto generalmente si creda.

Un assorbimento si verifica in seno al sospensoide per il fatto stesso che una fase solida è in presenza di un mezzo fluido che non è un solvente puro. Tutte le volte che una soluzione viene in contatto con certi corpi solidi, una parte della sostanza disciolta viene assorbita, e per lo stesso corpo assorbente, e per una stessa

concentrazione, sempre in eguale misura. Dunque si raggiunge un equilibrio, e questo è regolato da certe leggi che si possono esprimere con formole semplici, verificate sperimentalmente in moltissimi casi.

Il rapporto tra la quantità di sostanza assorbita e quella assorbente è per una data temperatura, proporzionale ad una potenza frazionaria della concentrazione. Questa potenza varia da corpo a corpo ed è per ciascuno caratteristica. Dunque, chiamando a la quantità assorbita, m l'assorbente, c la concentrazione d'equilibrio, k e p delle costanti, si ha

$$(1) \qquad \frac{x}{m} = k\, c^{\frac{1}{p}}$$

Se noi consideriamo per esempio l'idrosolo di idrato ferrico ottenuto per idrolisi del cloruro, e determiniamo il rapporto tra il cloro contenuto nelle particelle [millimoli per grammo di $Fe(OH)^3$ e quello del liquido ambiente, e poi calcoliamo lo stesso rapporto colla (1), ponendo

$$k = 4{,}26\,, \quad \frac{1}{p} = 0{,}272,$$

otteniamo i seguenti valori che dimostrano il perfetto accordo fra la teoria e l'esperienza.

$c\left(\frac{\text{millimoli}}{\text{Litro}}\right)$	$\frac{x}{m}$ (osservato)	$\frac{x}{m}$ (calcolato)
0,036	0,30	0,33
0,5	0.59	0,54
6,0	1,02	1,05

Anche per altri sospensoidi, per esempio, per il ferrocianuro di rame, furono fatte delle misure analoghe, verificando pienamente la teoria. Però queste esperienze non bastano a definirne la costituzione chimica. Ma per quanto difficile riesca la determinazione della dimensione dei granuli, data l'impossibilità di poterli contar tutti e l'incertezza sulla loro composizione e sul loro peso specifico anche quando questa sia nota, l'ultramicroscopio può fornire dei dati preziosi per lo studio dell'ottica dei sistemi colloidali, specialmente quando si tratta di idrosoli metallici.

§ 6. — *Ottica dei colloidi.* — I problemi teorici e sperimentali che suggerisce questa ricerca sono del più alto interesse, e in questi

ultimi tempi essi paiono avviati ad una brillante soluzione. Da molto tempo però i colori vivaci e svariati dei metalli allo stato colloidale avevano dato luogo a differenti teorie, fra le quali degna di nota fu certamente quella secondo la quale i granuli dovevano considerarsi come altrettanti risonatori. Ma oltre a ragioni teoriche che stanno contro questa opinione, vi sono fatti sperimentali che la contraddicono. Uno di questi è che arroventando su lamina di platino l'oro colloidale, si hanno dei residui che hanno precisamente lo stesso colore (rosso o bleu) dell'idrosolo, sebbene che la lunghezza d'onda della luce sia molto diversa nell'aria e nell'acqua.

C'è da tener conto sopratutto nello studio dell'ottica dei sistemi colloidali dell'emissione luminosa laterale delle particelle. In generale, una piccola parte soltanto della luce che si fa arrivare nel colloide è riflessa lateralmente, ma la maggior parte è assorbita dal metallo: però i granuli più grossi, per esempio quelli dell'oro bleu, emettono notevolmente nel rosso.

Nell'oro rosso, l'emissione ha un massimo per lunghezza d'onda comprese tra 560 e 570, e quello bleu invece emette meno nel verde che nel rosso. Quanto all'assorbimento, esso è massimo per l'oro rosso nel verde, e per il blèu nel giallo-aranciato e nel rosso. Di notevole interesse sono anche le misure sulla polarizzazione della luce emessa dai granuli. Quando si pone sull'oculare del microscopio un nicol analizzatore, si osserva facilmente che la luce da essi diffratta è polarizzata, almeno in gran parte, linearmente. Il piano di vibrazione è normale al raggio incidente.

Ma se nell'ultramicroscopio si manda della luce polarizzata, si osservano delle differenze notevoli nella forma delle figure di diffrazione, a seconda dell'oro che si studia. Nell'oro rosso, per esempio, i cerchietti mantengono il loro aspetto caratteristico, ma ciò non si verifica più per quello bleu. Evidentemente qui la figura geometrica dei granuli è diversa.

Del resto, a chi faccia, anche superficialmente, una osservazione ultramicroscopica, salta subito agli occhi la diversità di colore che assumono le particelle che costituiscono l'oro colloidale diversamente colorato. Ve ne sono sopratutto di verdi e di rosse; le prime appartengono all'oro rosso, le seconde al bleu. L'oro violetto appare costituito dalla miscela dei due. E siccome quando le particelle sono

piccole, assorbono molto (nel verde) ed emettono poco (nel rosso-giallo), e il contrario avviene quando sono grosse, così si deve ritenere che nel primo caso l'idrosolo sia rosso e nel secondo azzurro.

Questi fatti sperimentali furono tutti previsti dalla teoria. La quale però fu fatta soltanto nell'ipotesi che i granuli siano sferici, e dunque in un caso ideale, lontano probabilmente dalla realtà delle cose.

Del resto, prescindendo dalla grande complicazione delle formole, sarebbe forse possibile svilupparla ammettendo che le particelle siano ellissoidi ed allora si troverebbe un più preciso accordo coll'esperienza.

§ 7. — *Movimento browniano.* — Qualunque sia la composizione chimica dei granuli e qualunque siano le proprietà ottiche del colloidea cui appartengono, è facile accertarsi con l'esame ultramicroscopico che essi sono agitati da un continuo movimento, che è soltanto modificato dalla natura del mezzo e dal loro diametro. Questo moto — *il moto browniano* — non si arresta al decorrere del tempo e bisogna considerarlo come una conseguenza nello stato in cui si trovano le molecole dei corpi. Esso esiste già nelle sospensioni e va diventando più vivo di mano in mano che da queste si passa ai sospensoidi, ed in cifra tonda, si può ritenere che la velocità che induce sia di qualche micron per secondo per le particelle le cui dimensioni sono dell'ordine del micron. Ora, la teoria cinetica porta ad assegnare alla velocità molecolare dei valori enormemente più grandi — qualche centinaio di metri per secondo — e in tal modo è facile comprendere come una particella la cui grandezza sia tale che quella delle molecole non sia, al confronto, trascurabile, quando venga immersa in un fluido, debba essere sballottata irregolamente. In simil modo una barca segue sul mare, il movimento delle onde, e tanto meno quanto più le sue dimensioni crescono in modo, che essa possa ricevere in tutti i sensi degli urti i cui effetti si distruggono. Quando dunque una particella è sufficientemente piccola, gli urti molecolari non si possono compensare, e si ha un movimento, il quale dura finchè il fluido in cui è immerso possiede una certa quantità di energia interna.

Per istudiare teoricamente le leggi del moto browniano si può cominciare a considerare le relazioni che corrono tra diffusione e pressione osmotica.

Per il caso in cui le molecole del corpo sciolto siano molto grandi in confronto di quelle del solvente, si ottiene un'espressione per il coefficente di diffusione nella quale non entrano le grandezze dipendenti dalla natura della soluzione, all'infuori della viscosità del solvente e il diametro della molecola sciolta. Se ora si calcola la diffusione dovuta al fatto che le particelle sono animate da un moto irregolare, si arriva ad un'espressione che può essere eguagliata a quella ottenuta precedentemente. Così si può avere una formola che esprima, dato lo spostamento medio dei granuli, il coefficiente di diffusione in funzione della viscosità del solvente e del loro diametro. Il risultato è valido per qualunque corpo sospeso le cui dimensioni siano molto grandi in confronto a quelle delle molecole del mezzo, e precisamente vale la relazione :

$$D = \frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{6 \pi \eta \rho}$$

dove R è la costante dei gas, T, la temperatura assoluta, N il numero delle particelle contenute in una molecola grammo, η il coefficiente di attrito, e ρ il raggio delle particelle.

Ma è chiaro che lo spostamento medio dei granuli si può ricavare, nota che sia l'espressione di D. E si ha

$$\Delta = \sqrt{\frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{3 \pi \eta \rho}} \cdot \sqrt{\tau},$$

essendo τ il tempo.

Le esperienze di Svedberg confermano brillantemente la teoria. Egli trovò che, per uno stesso colloide, al variare del mezzo liquido in cui le particelle sono immerse, fra l'ampiezza del moto di queste e l'attrito interno di quello esiste una relazione di questo tipo

$$\Delta \eta = \text{costante},$$

che è l'equazione caratteristica dell'iperbole riferita agli asintoti. Anche per il coefficiente di diffusione la teoria è in accordo coll'esperienza, ma bisogna pensare però alla enorme difficoltà che presentano le determinazioni di questa natura, per le quali necessariamente deve esservi dell'incertezza. Intanto le difficoltà sperimentali hanno impedito finora una ricerca sistematica delle relazioni fra l'ampiezza del moto browniano e il diametro dei granuli.

Se c'è modo di misurare, almeno in alcuni casi particolari, il coefficente di diffusione dei sospensoidi, si deve pur ritenere che essi esercitino una pressione osmotica. Però questa non è osservabile con esperienze dirette.

Ma i recenti lavori di *Perrin* ne dimostrano l'esistenza e ne studiano le leggi. Intanto in seno ad una sospensione in equilibrio, si dimostra sperimentalmente che il numero dei granuli diminuisce dal basso all'alto secondo una legge esponenziale, come vuole la teoria cinetica.

D'altra parte le formole fondamentali di questa teoria conducono a stabilire una relazione fra il numero delle particelle sospese in un liquido e la pressione osmotica esercitata. Si ha:

$$\log \frac{n_0}{n} = \frac{1}{k} m\, g\, h \left(1 - \frac{1}{d}\right)$$

dove n_0 e n sono rispettivamente il numero delle particelle sospese ai livelli 0 e h, m la massa, d la densità delle particelle e g l'accelerazione di gravità. L'esperienza dà tutte queste grandezze, e la massa m che è determinata mediante la nota formola di Stockes, misurando la velocità di caduta per azione della gravità. Rimane da ricavare k che è la pressione osmotica, e, per la sospensione di gomma studiata da Perrin, si ha $k = 43 . 10^{-15}$ atmosfere.

Se questa sospensione si comportasse come un gas perfetto si avrebbe

$$k = \frac{\mathrm{R\,T}}{\mathrm{N}},$$

e calcolando R da questa formula, si ha 2,1 calorie invece di 1,98 calorie che si calcolano nel caso dei gas perfetti.

Si può concludere anche per questa via che il moto browniano è dovuto alle risultanti degli urti molecolari e che è possibile calcolare il peso molecolare della fase dispersa. Per la sospensione di gomma questo è 3.10^9.

Si capisce dunque facilmente come con esperienze crioscopiche non si possa calcolare il peso molecolare di un colloide, giacchè l'abbassamento del punto di congelazione non può essere misurabile coi nostri mezzi.

§ 8. — *Trasporto elettrico dei granuli.* — Alle proprietà che abbiamo studiato nei sistemi dispersi, dobbiamo ora aggiungerne una che ha un ufficio fondamentale nella teoria dei colloidi: lo stato elettrico dei granuli.

Se con un dispositivo facile ad immaginarsi, si sovrappone in un tubo ad *u* uno strato d'acqua distillata e uno di oro colloidale, in modo che due elettrodi costituiti da laminette di platino possano pescare nell'acqua, si osserva, adoperando per esempio una differenza di potenziale di 220 volts che, dopo un certo tempo, che dipende dalle dimensioni dell' apparecchio, i granuli si sono spostati dell'unità di lunghezza verso l'anodo.

Intanto, affinchè l'esperienza riesca bene è necessario che l'acqua abbia la stessa conducibilità del colloide e ciò si raggiunge assai facilmente, per certi sospensoidi, colla dialisi.

Però il fenomeno si osserva particolarmente bene mediante un esperienza dovuta a Cotton e Mouton. Adoperando l' apparecchio della figura 22 si fa una preparazione di notevole spessore, per modo che possano rimanervi immersi due elettrodi di platino costituiti da sottili laminette. Appena queste si pongono alla distanza di un centimetro o di una frazione di centimetro e si stabilisce fra loro una differenza di potenziale di alcuni volts si osserva che le particelle si muovono rapidamente verso una direzione determinata. Invertendo il segno degli elettrodi, lo spostamento è pure invertito. E lo spazio percorso da una particella sotto l'influenza del campo elettrico, può esser misurato col micrometro oculare, contando il tempo con un contasecondi. Però bisogna tener conto del fatto che le pareti del porta-oggetti e del copri-oggetti influiscono sull'andamento del fenomeno, tanto che si notano tre strati, nella preparazione ultramicroscopica, nei quali il movimento avviene alternativamente in senso opposto. Osservando la preparazione, in tutto il suo spessore, si notano due minimi di velocità nei due strati in cui la direzione dei granuli cambia senso. Nello strato di mezzo, non influenzato dalla vicinanza delle pareti, i granuli si dirigono in forza della loro carica elettrica, e qui si ha il massimo della velocità. Come poi l'influenza delle pareti si esplichi non è qui il caso d'indagare.

I valori che si ottengono fanno ritenere che la *mobilità* di un

granulo colloidale metallico, ossia la velocità che acquista in un campo di un volt per centimetro, sia di circa $20 . 10^{-5}$ centimetri per secondo.

Osservando con corrente alternata, il fenomeno diventa straordinariamente interessante, giacchè i granuli assumono un movimento pendolare collo stesso periodo che spetta alla corrente che li fa muovere.

La teoria di questi fenomeni si deve ad Helmoltz. Egli ammise che alla superficie delle due fasi si formi un doppio strato elettrico ossia che, lungo la superficie di contatto e a piccolissima distanza fra di loro vi siano due distribuzioni di elettricità, una positiva e l'altra negativa. Una differenza di potenziale serve a scindere il doppio strato e far sì che il granulo sia spinto con una certa velocità verso un polo, positivo o negativo. Quale debba essere questo si può determinare a priori dalla natura della sostanza che costituisce il granulo e dal mezzo dispersivo, mediante una regola empirica trovata da Coehn: quello dei due che abbia una costante dielettrica più grande, assume una carica positiva.

Come resultato dell'esperienza si può ammettere che *all'anodo* vanno, in generale, gli idrosoli metallici e le loro combinazioni, l'acido stannico; al *catodo* l'idrato ferrico di alluminio, di cromo, l'acido titanico e l'idrato di Torio.

La velocità colla quale una particella immersa in un liquido si muove in forza di un campo elettrico non varia al variare del diametro, e in sospensioni di licopodio e di quarzo e d'oro, allo stesso modo come in colloidi di oro, di platino e di argento, la *mobilità* dei granuli, si mantiene dello stesso ordine.

Ma si può anche introdurre nelle formule il raggio dei granuli e vedere, nel caso dei colloidi, quale sia la carica elettrica trasportata da ciascuno di essi.

Le misure che si possono fare direttamente coll'ultramicroscopio sui colloidi metallici ci dànno l'ordine di grandezza dei loro granuli, e le esperienze di trasporto elettrico portano alla determinazione della mobilità di questi. D'altra parte possiamo considerare ciascuna particella come una sfera che si muove in un liquido viscoso e applicare le formole dell'idrodinamica. La differenza di potenziale che agisce sia φ, e chiamiamo e la carica di ciascun

granulo di raggio ρ: allora potremo dire, scrivendo la formula di Stokes, che la velocità u è data da:

$$u = \frac{e \varphi}{6 \pi \eta \rho},$$

dove η è la velocità del mezzo, ed essendo

$$u = k \varphi,$$

dove k è la mobilità,

$$e = 6 \pi \eta \varkappa \rho.$$

Si conosce η, ρ, k; e non resta che ricavare e.

Questa grandezza è, quando le particelle hanno le dimensioni che caratterizzano il campo di esistenza dei sospensoidi, dello stesso ordine di quella di un jone.

Di più la mobilità dei granuli è la stessa che possiedono i *grossi joni* che si trovano per es. nell'emanazione del fosforo e nell'atmosfera. Si potrà dunque stabilire, seguendo un'ipotesi del Righi, delle analogie fra i due ordini di fenomeni, in apparenza disparatissimi.

Colle proprietà elettriche dei sospensoidi è intimamente connessa la loro stabilità. Se si prende per esempio l'idrosolo di idrato ferrico che è un colloide positivo e su di esso si fanno agire i raggi β del radio se ne ottiene lentamente la coagulazione.

Esperienze simili furono fatte su certi colloidi negativi e si trovò che su di questi agiscono i soli raggi α.

Mescolando poi due colloidi, positivo e negativo, precipitano ambedue: se uno è in eccesso, si ottiene un colloide del suo segno.

§ 9. — *Coagulazione dei sospensoidi.* — Ma il fatto saliente su cui è specialmente fondata la teoria, è quello della precipitazione dei sospensoidi cogli elettroliti, che si ottiene anche quando questi sono aggiunti in piccolissima quantità.

Però c'è subito da osservare che esiste una concentrazione minima al di sotto della quale non è possibile in alcun modo separare la fase solida dispersa. Così, per esempio, per precipitare con cloruro di potassio 100 cc. di soluzione colloidale di solfuro di arsenico, è necessario che la concentrazione dell'elettrolito sia superiore a 2,438

millimolecole per litro. Questo fenomeno fa ricordare quello della cristallizzazione delle soluzioni soprasature, per ottenere la quale basta un piccolo germe cristallino. Al di sotto di un certo limite di peso, stabilito sperimentalmente da Ostwald l'azione catalitica dei germi scompare. L'anologia del resto non si può spingere oltre perchè i due ordini di fenomeni sono troppo diversi fra di loro.

Intanto, collo stesso elettrolito, tutti i sospensoidi non agiscono allo stesso modo, giacchè è facile stabilire, con esperienze dirette, che la precipitazione dei colloidi negativi dipende dal catione e quella dei positivi dall'anione.

Questo fatto del resto risulta evidente quando si facciano agire sali di uno stesso acido sopra diversi colloidi positivi o negativi. Mentre che per i primi, al variare della base non si verifica alcun cambiamento nell'azione precipitante dell'elettrolito, per gli altri, la sostituzione di un metallo bivalente a uno monovalente e di un trivalente ad uno bivalente modifica in modo molto sensibile l'andamento del fenomeno. Per es. se noi consideriamo l'idrosolo di solfuro di arsenico, (i cui granuli nelle esperienze di trasporto elettrico migrano verso il polo positivo), e sopra 100 cc. di esso facciamo agire in tre vasi diversi, delle soluzioni

$$\frac{N}{2} \textit{ di } K_2SO_4, \; MgSO_4, \; Al_2(SO_4)_3,$$

vediamo facilmente che per diminuire dello stesso grado la stabilità del sospensoide occorrono nel primo caso molti più centimetri cubici di elettrolito che nel secondo, e che bastano soltanto poche goccie del sale del metallo trivalente.

Si può parlare dunque di «*potere precipitante*», il quale si può esprimere coll'inversa della concentrazione molecolare dell'elettrolito adoperato. Se, per il caso del solfuro di arsenico, indichiamo con a', a'', a''' le concentrazioni delle soluzioni di elettroliti col catione rispettivamente monovalente, bivalente, trivalente, che provocano con ugual numero di centimetri cubici la stessa precipitazione su una stessa quantità di colloide, si trovano questi rapporti:

$$a' : a'' : a''' = 350 : 20 : 1$$

Relazioni analoghe a quelle che esistono per il solfuro di arsenico si trovano, per quanto riguarda il comportamento degli elet-

troliti, coll'idrato ferrico, colla differenza però che, trattandosi di un colloide positivo, influiscono sul fenomeno soltanto gli anioni. E i sospensoidi dei due segni si comportano secondo questi due tipi.

Sebbene che i fenomeni della precipitazione dei sospensoidi per opera degli elettroliti siano stati oggetto di un numero enorme di ricerche, pure non si può ancora affermare che esistano delle relazioni ben definite tra la concentrazione del colloide e la quantità del sale necessaria per precipitarlo. Di più, a seconda che il tempo impiegato nell'aggiungerlo è più o meno lungo, gli effetti sono diversi.

Ad ogni modo, si tratta di un fenomeno irreversibile, giacchè non è possibile far ritornare la base separata allo stato di dispersione a cui si trovava prima.

L'analogia dei fenomeni di precipitazione operati dagli elettroliti con quelli elettro-capillari porta ad estendere la teoria di Helmoltz, e a ritenere che quando i granuli vengono scaricati elettricamente debbono comportarsi in modo che la loro tensione superficiale diventi massima. Ciò corrisponde evidentemente ad un agglomeramento da parte loro, ossia alla coagulazione.

Non altrimenti nell'elettrometro capillare del *Lippmann* si osservano gli spostamenti del menisco della colonnina di mercurio a contatto con l'acido solforico diluito, dovuti alla variazione della tensione superficiale quando si stabilisce una differenza di potenziale agli elettrodi.

§ 10. — *Fenomeni di catalisi.* — Ma vi sono delle quistioni di alto interesse dal punto di vista chimico che riguardano la composizione dei coaguli. Questa è variabilissima e ciò fa concludere che non si tratta di composti definiti. Qui entrano in gioco i fenomeni di assorbimento che necessariamente vengono ad avere, in tutta la chimica dei colloidi, un'influenza preponderante. La quale si esplica anche in quei fenomeni caratteristici presentati da certi colloidi e precisamente dai colloidi metallici per cui questi furono chiamati « *fermenti inorganici* ». E si può dire che alla teoria della catalisi gli studi sui colloidi metallici abbiano portato un notevole contributo, introducendo anche talvolta qualche ipotesi atta a chiarire, almeno in alcuni casi particolari, il meccanismo di questi processi che, pur essendo così comuni, restano così misteriosi. Il platino col-

loidale accelera le stesse reazioni che la spugna di platino, come, per esempio, la decomposizione dell'acqua ossigenata o dei sali dell'acido ipocloroso, l' ossidazione dell' ioduro di potassio coll' ossigeno dell'aria, ecc., ma mentre che nel caso della spugna di platino è verificata la teoria delle reazioni che avvengono alla superficie di separazione tra una fase solida e una liquida o gassosa, nel caso del colloide le cose sono enormemente più complicate.

La reazione: $$2\,H_2\,O_2 = 2\,H_2\,O + O_2$$
in presenza di spugna di platino procede come una reazione del primo ordine ed ha una costante proporzionale alla potenza $^2/_3$ della velocità con cui si agita il liquido, e alla prima potenza della superfice del catalizzatore, e inversamente proporzionale al volume del liquido. Questo, sostanzialmente è ciò che richiede il principio Nernst-Brunner, il quale per essere esteso al caso delle reazioni che avvengono in presenza di colloidi metallici ha bisogno di essere modificato introducendovi l'influenza esercitata dall'assorbimento e dal moto browniano che produce un'agitazione del mezzo. E' precisamente in seguito all'assorbimento che ha luogo una variazione di concentrazione alla superfice limitante le due fasi e ciò determina un'accelerazione nella reazione. E questa può essere impedita da «*veleni*», come l'acido prussico, l'joduro di cianogeno, l'jodio, ecc. Anche in questi processi l'assorbimento ha un'influenza notevolissima, anzi si può ritenere che l'intensità dell'*avvelenamento* sia espressa da una relazione, che, almeno formalmente è equivalente a quella che rappresenta l'isoterma dell'assorbimento. In altri termini, l'avvelenamento è tanto più intenso, quanto più grande è la quantità di sostanza assorbita.

Dal punto di vista dell'energetica i fenomeni catalitici di cui trattiamo per i quali le ipotesi fatte permettono di imaginare, almeno approssimativamente, il meccanismo, sfuggono all'investigazione quantitativa. La presenza dei colloidi metallici, come la luce in certi casi, come acidi o basi in condizioni particolari e per particolari reazioni, influisce enormemente sopra i termini che rappresentano l'attrito nelle formule della dinamica chimica. Come vi influiscano noi non sappiamo in generale, e soltanto i risultati dell'esperienza potranno un giorno far risolvere questo problema che è il più importante della teoria delle reazioni.

§ 11. — *Emulsoidi.* — Per ispiegare il comportamento della seconda grande classe di colloidi è necessario ammettere che la fase dispersa sia liquida. All'infuori di alcuni pochi sono prodotti naturali la cui composizione chimica è spesso ignota. Bisogna anzi osservare che una delle ragioni per le quali la Zoochimica è, in alcuni capitoli, così poco progredita, sta nel fatto che le sostanze di cui tratta in essi sono emulsoidi. Non è necessario essere chimici sperimentati per comprendere come sia in tal caso estremamente difficile la separazione e la purificazione dei corpi.

I tipi principali di emulsoidi si riducono particolarmente a tre: acido silicico, gelatina e bianco d'ovo.

Intanto è facile convincersi dell'etereogeneità di queste sostanze osservando che esse presentano il fenomeno di Tyndall; ma le ricerche ultramicroscopiche dimostrano che i granuli sono spesso tanto piccoli che non è possibile vederli anche coi mezzi più potenti di illuminazione. Talvolta, essendo le dimensioni dei granuli di uno stesso colloide assai variabili, ne compare qualcuno sotto il campo, ed è facile controllare che il numero e lo splendore decresce al crescere della diluizione. Questo sta in accordo coll'ipotesi che le due fasi che costituiscono il colloide siano liquide e precisamente siano due soluzioni, di cui una è diluitissima (mezzo dispersivo) e l'altra concentratissima (corpo sospeso).

L'aggiunta del solvente ne attenua la differenza fra l'indice di rifrazione, e impedisce, a partire da una certa misura, il che si formino i due dischetti di diffrazione.

Il moto browniano di quelle particelle è in generale assai lento e, d'altra parte, non è possibile studiarlo sistematicamente. Però coll'esistenza del moto browniano è connesso il fatto che c'è una diffusione degli emulsoidi, di cui è possibile misurare il coefficente. Per esempio, alla temperatura di 7°,75 il coefficente di diffusione dell'albumina d'ovo, espresso in centimetri per secondo e moltiplicato per 10^5 è 0,052, quello della pepsina a 12, è 0,073, e quello dell'invertina a 16°,6 è 0,041.

Da questi numeri si ricava che una soluzione che contenesse 10 grammi di colloide in un litro avrebbe una pressione osmotica di 7 millimetri di mercurio. Allora il punto di congelazione sarebbe abbassato di 0,001°. È chiaro che sperimentalmente, con le misure più

accurate e coi metodi più perfetti, non sia possibile determinare grandezze di quest'ordine.

Notevole per la teoria è il comportamento elettrico dei granuli degli emulsoidi. Prima di tutto, il bianco d'ovo dializzato a lungo è elettricamente neutro e molto stabile. I fenomeni di coagulazione sono poi spesso indipendenti dal segno e dal valore della carica dei granuli. Il trasporto elettrico dei granuli, è quasi nullo, e ciò sta in armonia coll'ipotesi fatta su la costituzione degli emulsoidi. È noto infatti che certe miscele di liquidi, nell'intorno del loro punto critico non subiscono alcun trasporto elettrico, nemmeno con una differenza di potenziale di 3200 volts.

Ma il fatto che con maggior sicurezza ci fa persuasi che la fase dispersa sia liquida è questo, che misurando la viscosità di certi emulsoidi prima con un metodo e poi con un altro, si ottengono dei valori differenti. Per esempio, il valore della viscosità determinata col metodo dello spostamento del diaframma è considerevolmente più grande che quello ottenuto col metodo dell'efflusso. Ora, in un liquido omogeneo le due misure portano sempre allo stesso risultato, e così avviene nei sospensoidi, dove una delle fasi è solida. Qui siamo invece nel caso di di due fasi la prima delle quali è una soluzione molto diluita della sostanza che costituisce il colloide, e l'altra molto concentrata, e quando il diaframma si sposta, pur rimanendo costanti le viscosità relative delle due fasi, avviene verosimilmente che alcune goccie del liquido più denso vi aderiscano e si rompano, e che insomma vengano a crearsi delle circostanze che ne possano affrettare o ritardare il movimento.

Non dalla viscosità presa nel suo valore assoluto, ma dalle proprietà che con essa sono legate negli emulsoidi dipendono i fenomeni di doppia rifrazione accidentale. Infatti la glicerina o le soluzioni concentrate di zucchero, ancorchè molto viscose, non la mostrano, mentre che essa si osserva specialmente bene nella gelatina. Sono dunque le proprietà elastiche della fase dispersa che determinano il fenomeno e specialmente gli stati di tensione e di compressione, nei quali, per mezzo di agenti esterni, può essere messa.

§ 12. — *Coagulazioni reversibili.* — Il valore assoluto della viscosità degli emulsoidi è altissimo e cresce molto rapidamente all'aumentare della concentrazione: la temperatura poi ha su di esso

una influenza enorme. I processi di gelatinizzazione sono dovuti in gran parte a questo aumento di viscosità. Ognuno sa che questi fenomeni sono reversibili ed irreversibili a seconda delle varie categorie di emulsoidi, e, per lo stesso emulsoide, a seconda delle condizioni cui viene sottoposto. Così l'aumento di viscosità nell'idrosolo di gelatina o di agar operato per abbassamento di temperatura, è un processo reversibile, ma così non si può dire della gelatinizzazione operata per esempio dalla formaldeide. Nel primo caso si può determinare per ogni concentrazione una temperatura alla quale si ottiene l'*idrogel*, data la concentrazione dell'idrosolo. L'aggiunta di certi sali abbassa notevolmente questo «*punto di fusione*», di altri, lo innalza: e, in generale, si può ritenere che ai primi appartengano i cloruri, bromuri, ioduri e nitrati e ai secondi i solfati, i cromati, i citrati, tartrati e acetati.

Questa influenza dei sali dipende dalla natura degli ioni e si possono ordinare tanto gli anioni come i cationi secondo una serie i cui termini, da sinistra a destra, vanno di mano in mano abbassando il punto di solidificazione della gelatina:

$$SO_4, Cl, Br, NO_3, Cr_2O_7, I$$

$$K, Ca, Na, Cd, Sr, Mg.$$

Il metodo più sicuro e più razionale per istudiare sperimentalmente l'andamento di questi fenomeni è quello di determinare la variazione della viscosità dell'emulsoide per rispetto al tempo. Questa variazione, a temperatura costante, sarà tanto più rapida quanto più grande è la facoltà di gelatinizzare del colloide.

Se noi, dalla gelatina, passiamo a considerare il bianco d'ovo, vediamo che sopra di questo certi sali inorganici come p. es. i sali di ammonio e di magnesio provocano delle modificazioni reversibili della stabilità.

Questo fenomeno si chiama coagulazione. Aggiungendo il sale a una concentrazione sufficiente, si ha un precipitato, il quale si ridiscioglie colla diluizione.

Ma i componenti del bianco d'ovo possono subire anche una coagulazione irreversibile innalzando la temperatura fino ad un grado determinato per ciascuno. Ebbene: la proprietà notevole dei sali dei metalli alcalini è quella d'influire su questo grado di temperatura.

Gli studii di Pauli su la globulina hanno messo in chiaro che la temperatura di coagulazione cresce fino ad un massimo all'aumentare della quantità di sale, poi va diminuendo. Si trova che il magnesio innalza più degli altri cationi la temperatura di coagulazione e l'iodio più degli altri anioni.

§ 13. — *Coagulazioni irreversibili.* — Del resto, la coagulazione degli emulsoidi del bianco d'ovo ottenuta per innalzamento di temperatura è essenzialmente irreversibile. Però bisogna osservare che se noi operiamo con soluzioni diluite di bianco d'ovo sottoposte a lunga dialisi, così da liberarle completamente dagli elettroliti, esse non coagulano più quando vengono riscaldate. Una coagulazione completa è solo possibile quando il colloide ha reazione leggermente acida. Ma anche i sali dei metalli pesanti dànno luogo negli emulsoidi di questo tipo a fenomeni di coagulazione irreversibile. E' notevole però un fatto che si osserva specialmente bene col solfato di zinco. Quando se ne aumenta gradatamente la concentrazione, fino a un certo limite, si hanno valori crescenti della quantità di coagulo. A temperatura costante, per concentrazioni maggiori del sale, questa diminuisce fino a raggiungere un minimo, indi riprende a crescere, aumentando ancora la concentrazione del sale.

Fra i fenomeni irreversibili che presentano gli emulsoidi è da annoverare, oltre la gelatinizzazione prodotta dai non elettroliti come la formalina, il passaggio a *idrogele* dell'acido silicico. Questo, preparato dal silicato di potassio per aggiunta di acido cloridrico, lasciato a sè per un certo tempo, si rapprende in una massa gelatinosa che non può ritornare allo stato di idrosolo.

§ 14. — *Struttura dei geli.* — La struttura dei *geli,* dalla quale dipendono tutte le proprietà caratteristiche di questi corpi, si può studiare assai bene riferendosi ad alcuni fenomeni che si osservano mescolando opportunamente due liquidi. Per esempio alcune gocce di un olio contenente acidi grassi in una soluzione di soda, dànno luogo, senza alcuna azione meccanica, ad un'emulsione. Si formano dei piccoli tentacoli a partire da ciascuna goccia di olio. Se poi si mescolano bianco d'ovo, olii grassi e acqua si ottengono degli effetti analoghi ed i piccoli tentacoli, in forza della tensione superficiale tra olio e acqua, sono animati da un movimento che fa ricordare quello del protoplasma vivente.

Con miscela di acido oleico e ammoniaca diluita si ottengono delle strutture rappresentate dalla figura 23. Ma, miscele di olio di oliva con acqua per aggiunta di poco carbonato potassico o cloruro sodico, dànno luogo ad una struttura reticolare costituita di tanti poliedri (fig. 24).

Per ogni nodo vi è l'incontro di tre piccole superfici sotto diversi angoli. Una struttura completamente analoga mostra per esem-

Fig. 23.

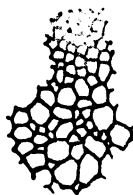



Fig. 24.

pio la gelatina contenente il 2 % di acido cromico o di alcool, e il bianco d'ovo coagulato per riscaldamento o per azione di sali.

Per certi derivati minerali dell'acido silicico si riscontrarono anche delle simili strutture, sicchè si può ritenere che siano caratteristiche per gli emulsoidi. È dimostrato così che il processo della coagulazione si svolge colla separazione delle due soluzioni di cui molti fatti ci hanno già provato l'esistenza, ed alla superficie che le divide c'è una tensione che varia colla quantità d'acqua. In forza di questa tensione superficiale il liquido più viscoso assume la struttura caratteristica che abbiamo sommariamente descritta.

§ 15. — *Diffusione degli elettroliti nei geli.* — Così si riesce a comprendere perchè la diffusione dei sali nella gelatina avviene, sotto certe condizioni, colla stessa velocità colla quale avviene in acqua. E per determinare il *coefficiente di diffusione* si può ricorrere ad un'esperienza che permette di arrivare a risultati, molto precisi. Si versa in una vaschetta rettangolare, stretta alta ed assai lunga, uno strato di gelatina e sopra di essa, dopochè sia ben solidificata, un volume di soluzione di concentrazione nota di un sale. Dopo quattro o cinque ore si manda nella gelatina un fascio di raggi di luce parallelo allo spigolo di base della vaschetta, e si osserva che esso subisce un'inflessione dal basso all'alto. L'esperienza si può anche

fare mescolando la gelatina col sale a una temperatura superiore a quella di gelatinizzazione e poi, dopo aver raffreddato, versandovi sopra dell'acqua pura. In questo caso il fascio luminoso è incurvato verso il basso.

L'indice di rifrazione, che è una funzione lineare della concentrazione, varia secondo una direzione x in modo continuo secondo la legge definita dall'equazione della diffusione. Se si pone infatti

$$n = a c + b$$

dove n è l'indice di rifrazione, c la concentrazione, a e b sono costanti, si deve avere

$$\frac{d n}{d t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \qquad (1)$$

essendo D il coefficiente di diffusione e t il tempo.

Ora la teoria dimostra che la trajettoria luminosa è contenuta nel piano $x y$, ed ha per equazione

$$dy = \pm \frac{k \, d x}{\sqrt{n^2 - k^2}} \qquad (2)$$

con k costante. L'espressione di n si ricava integrando (1), quando si pongano le condizioni imposte dal modo con cui si eseguisce l'esperienza, e così è possibile ridurre, nel caso nostro, l'integrazione della (2) al calcolo di un integrale ellittico di prima specie.

Determinando sperimentalmente la y e la x per ogni tempo t_1, t_2, t_3...., si può dunque dall'equazione ricavare D.

Che se noi facessimo circolare sopra la gelatina la soluzione del sale la cui concentrazione fosse così mantenuta invariabile, il calcolo dimostra che la traiettoria luminosa nella gelatina sarebbe una parabola. Così si potrebbe più semplicemente calcolare la D.

Il resultato di queste misure è che in generale questo coefficiente è lo stesso che nell'acqua, purchè la gelatina non contenga sostanze estranee disciolte, e che non sia stata sottoposta a cambiamenti di temperatura.

Ma la diffusione dei sali nella gelatina dà luogo a dei fenomeni di grande interesse. Intanto se noi prendiamo un cilindro di gelatina imbevuta di una traccia di fenolftaleina arrossata da un po' di alcali, e vi facciamo diffondere una soluzione di cloruro ferrico, dopo

qualche ora si osserva che vi sono nel cilindro tre zone diversamente colorate, di cui la prima è la porzione arrossata dalla fenolftaleina dove il sale non è ancor penetrato. Ma questo, idrolizzato com'è, e preceduto dall'acido cloridrico il quale scolora la fenolftaleina fino al punto in cui si vede il giallo del cloruro ferrico.

Ma supponiamo di far diffondere ai due capi di un cilindro di gelatina dializzata due sali che possano reagire fra loro dando luogo a composti insolubili, per esempio cloruro di bario e solfato di argento.

Essi, dopo un certo tempo s'incontreranno e il punto d'incontro sarà determinato dai loro coefficienti di diffusione. Si potrebbe supporre che là avvenisse la reazione

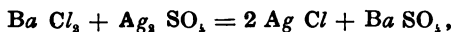
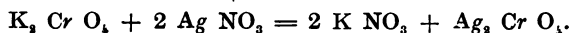
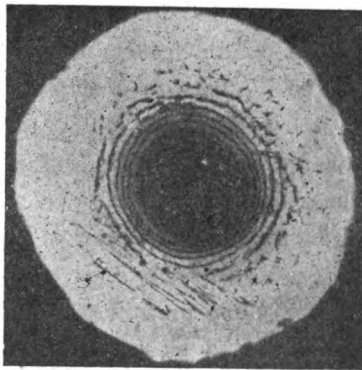
$$Ba\,Cl_2 + Ag_2\,SO_4 = 2\,Ag\,Cl + Ba\,SO_4,$$

e la formazione simultanea dei due precipitati, ma invece si osserva la formazione di due setti insolubili distinti, uno di cloruro di argento e l'altro di solfato di bario. Anche qui si potrebbe invocare l'idrolisi dei sali per spiegare il meccanismo di questo fenomeno, ma non sempre questa ipotesi sarebbe accettabile. E allora la spiegazione più ovvia è quella che Ostwald diede a proposito di una certa esperienza dovuta a Liesegang.

Fig. 25.

Sopra una lastra di vetro viene steso un sottile strato di gelatina contenente alcune gocce di soluzione diluita di cromato di potassio. Dopo ci si pone una goccia di soluzione normale di nitrato d'argento, dimodochè una diffusione si stabilisce nel colloide e contemporaneamente avviene la reazione:

$$K_2\,Cr\,O_4 + 2\,Ag\,NO_3 = 2\,K\,NO_3 + Ag_2\,Cr\,O_4.$$

Però il cromato di argento insolubile si depone sotto forma di tanti anelli che sono ciascuno l'imagine del contorno della goccia (fig. 25) e vanno sempre allargandosi di mano in mano che la diffusione procede.

Ostwald dice: « Per mezzo della diffusione del sale di argento « nella gelatina imbevuta di cromato, si forma subito nella gelatina « stessa una soluzione che è soprasatura per rapporto al cromato di « argento. Il precipitato però non si forma subito, ma solo quando « il limite metastabile sia raggiunto. Ciò naturalmente avviene con- « temporaneamente nel cerchio concentrico al contorno della goccia. « Intorno al precipitato si deposita il cromato di argento per rap- « porto al quale l'intorno dell'anello è soprasaturo, e lo rinforza, e « ciò dura finchè il cromato solubile non sia andato tutto a far parte « del precipitato. Allora il sale di argento diffonde fuori dell'anello, « rende di nuovo soprasatura una zona circolare e si ripete lo stesso « fenomeno. E siccome la soluzione di argento per diffusione diventa « sempre più diluita, la concentrazione critica alla quale comincia « la precipitazione è raggiunta di mano in mano sempre più tardi « e le distanze che intercedono fra i nuovi anelli si fanno più « grandi ».

Da un punto di vista più generale, il problema da risolvere è quello di determinare per ogni punto dal mezzo dove avviene la diffusione le concentrazioni dei componenti della reazione. Si tratta dunque d'integrare il sistema di equazioni differenziali a derivate parziali che risulta dalla combinazione della legge dell'azione di massa con quella della diffusione. Ma ciò non è in generale possibile, almeno imponendo le condizioni compatibili coll'esperienza. Solo in alcuni casi particolari si può forse raggiungere l'intento.

§ 16. — *Azione degli emulsoidi sui sali e sui sospensoidi.* — Non è escluso che un'influenza notevole abbiano certe azioni esercitate dalla gelatina su certi sali. Per esempio, se invece di fare la reazione tra nitrato d'argento e bicromato di potassio in acqua, noi la facciamo in presenza di gelatina, non otteniamo il precipitato rosso di bicromato d' argento finchè non aumentiamo notevolmente la concentrazione dei sali reagenti. La stessa azione è esercitata da soluzioni concentrate di saccarosio. Nè l'azione si arresta ai cristalloidi, ma si estende ai sospensoidi. Sono note le esperienze di Zsigmondy che dimostrano come l'oro colloidale rosso venga *protetto* dalla gelatina contro gli agenti instabilizzanti. Se si aggiunge ad una quantità relativamente considerevole di oro rosso alcune gocce di soluzione al 10 °/₀ di un elettrolito, per esempio, di cloruro

sodico, esso cambia quasi istantaneamente colore: da rosso passa a violetto poi a bleu, e indi si depositano sul fondo del vaso i granuli sotto forma di polvere nerastra. Il processo si segue bene all'ultramicroscopio. Aggiungendo, nella vaschetta contenente l'oro da esaminare, la soluzione di sale, si vede subito un agitarsi irregolare quasi vorticoso delle particelle che prima apparivano piccolissime, mentre si formano dei granuli di color rossastro. Il fenomeno si osserva particolarmente bene coll'oro preparato colla glicerina, giacchè, in questo caso, operando la riduzione in presenza di un po' di alcali, il colloide è costituito da granuli tanto piccoli che non è possibile discernerli anche con un'intensissima illuminazione. Il cono luminoso biancastro — una specie di via lattea della costellazione ultramicroscopica — cambia repentinamente aspetto non appena si aggiunge il sale: i granuli appariscono e cresce il loro diametro mentre che non cessa se non dopo un po' di tempo il formicolio vorticoso.

Contemporaneamente il liquido passa dal violetto al bleu, e dunque si potrebbe ritenere che con questo cambiamento di colore fosse legato il diametro dei granuli.

Ma esperienze accurate fanno ritenere che si tratti piuttosto di un riavvicinamento dei granuli piccoli che avrebbe per effetto di spostare il massimo dell'assorbimento verso il rosso. Questo si deduce sopratutto da un lavoro di Kirchner e Zsigmondy sopra la proprietà che hanno le lastre di gelatina imbevute di oro colloidale di essere rosse quando sono umide e violette quando sono secche. Queste lastre, studiate spettrofotometricamente, permisero di verificare la teoria.

Ebbene: se noi proviamo ad aggiungere ad una soluzione di oro colloidale rosso qualche centimetro cubo di gelatina dializzata al 0,01 % o anche al 0,001 %, troviamo che è necessaria una quantità di ettrolito assai maggiore di prima per ottenere il cambiamento di colore e la precipitazione. E si può definire il “ *numero d'oro* „ come il numero di milligrammi di colloide organico che non riesce più ad impedire il mutamento di colore di 10 centimetri cubici di soluzione colloidale d'oro al 0,005 %, per aggiunta di un centimetro cubo di cloruro sodico al 10 %. Per la gelatina, il numero d'oro è compreso tra 0,005 e 0,01; ma altri colloidi organici stabilizzano, e, per l'albumina d'ovo il numero d'oro è compreso tra 0,15 e 0,25, per la gomma arabica tra 0,15 e 0,25, e per la destrina tra 6 e 12.

L'oro colloidale stabilizzato non perde le sue proprietà: il moto browniano rimane, il colore non muta, e non si apprezzano variazioni nella mobilità dei suoi granuli posti in un campo elettrico. Ma se si prepara, anzichè in acqua distillata, nella gelatina diluita l'oro colloidale, la soluzione che si ottiene apparisce, all'ultramicroscopio, molto più omogenea. Diminuendo a poco a poco la quantità percentuale di colloide protettivo, si raggiunge l'eterogeneità di prima.

Intanto bisogna ricordare che basta la sola gelatina per operare la riduzione del cloruro d'oro in oro colloidale, purchè si mantenga il liquido ad una temperatura sufficientemente alta, e poi l'analisi ultramicroscopica rivela questo fatto interessante che il sospensoide ottenuto in presenza di gelatina ha lo stesso numero di granuli che questa. Si può dunque ritenere che gli amicroni di cui è in gran parte costituito l'emulsoide e i piccoli submicroni assorbano una parte del cloruro d'oro, in modo che la riduzione avviene poi in granuli così fini che di poco viene alterata l'omogeneità della soluzione.

Ma notevole è il fatto che in questo caso il " numero d'oro " non esiste più. Si può aggiungere quanto elettrolito si vuole all'oro colloidale preparato in presenza di gelatina che esso non cambia colore nè si altera in alcun modo. Per ottenere il passaggio a violetto e bleu è necessario aggiungervi una quantita di un sale, per esempio, solfato di potassio, e sottoporlo all'elettrolisi. In tal modo. al polo positivo, si ottiene in poco tempo la trasformazione.

§ 17. — *Imbibizione.* — La natura e il comportamento degli emulsoidi si rivelano in modo cospicuo nei fenomeni d'imbibizione. Infatti essi risultano talvolta da certe sostanze animali o vegetali allo stato solido, amorfo, le quali, a contatto con liquidi, si gonfiano, assorbendoli, e poi, per aumento lieve di temperatura, dànno luogo al colloide.

Ma il volume a cui si arriva è minore della somma del volume del solido e di quello dell'acqua assorbita, e questa contrazione è accompagnata da uno sviluppo di calore il quale le è proporzionale. La pressione, quando la sostanza comincia a gonfiarsi è enormemente grande e si può manifestare vincendo delle grandissime resistenze.

Questa facoltà d'imbibizione è legata colla struttura microscopica reticolare, che in certo modo si può considerare spugnosa, dei geli;

e la velocità colla quale il fenomeno procede si puo calcolare teoricamente considerando il valore massimo della quantità di liquido assorbibile.

Questo massimo dipende dalla natura chimica dei corpi che si considerano, dalla temperatura e dalla pressione, e nel suo intorno, il processo è molto lento. Il grado d'imbibizione varia col tempo in modo che la variazione è proporzionale alla differenza tra il massimo valore possibile e il valore attuale, o, in altri termini:

$$\frac{d\,q}{d\,t} = k\ (m - q)$$

dove k è costante, e gli altri simboli hanno un significato ovvio.

Considerando una piastra molto sottile, si ha immediatamente

$$t = \frac{1}{k} \int_{q}^{q_1} \frac{d\,q}{m - q}$$

ed essendo q_1 il grado d'imbibizione al tempo t_1,

$$k = \frac{1}{t_1 - t}\ log.\ \frac{m - q}{m - q_1}.$$

I valori che si calcolano con questa teoria concordano assai bene con quelli trovati sperimentalmente.

I metodi di ricerca si fondano sulla determinazione del peso del liquido assorbito, e sullo studio delle proprietà ottiche e di quelle elettriche specialmente in riguardo alla conducibilità. Intanto risulta dall'esperienza che v'è una relazione di reciprocità tra l'attitudine di certi corpi solidi ad essere imbevuti di liquido e l'attrito interno degli emulsoidi che ne risultano.

Ma l'influenza del mezzo in cui l'imbibizione avviene è notevole. Per esempio l'aggiunta di elettroliti può favorire o impedire il processo d'imbibizione, e in generale, si può ritenere che i diversi sali si possano disporre in una serie i cui termini siano gli stessi di quell'altra che si riferiva all'azione degli elettroliti sulla coagulazione. Ma ora la serie è invertita: il sale che favoriva la coagulazione, impedisce l'imbibizione.

L'influenza della concentrazione è complicata e non ben chiarita.

L'imbibizione avviene anche nel vapore, ma questo processo è in molti punti diverso da quello che si osserva nei liquidi. Un pezzo di gelatina, gonfiato con acqua, se è messo nel vapore perde acqua: se invece era gonfiato in una soluzione di un solfato, ne acquista. Dunque l'imbibizione nel vapore avviene, ma è più piccola che nell'acqua.

Questo fenomenó conduce alla considerazione della disidratazione dei geli, oggetto delle ricerche classiche di Van Bemmelen. I

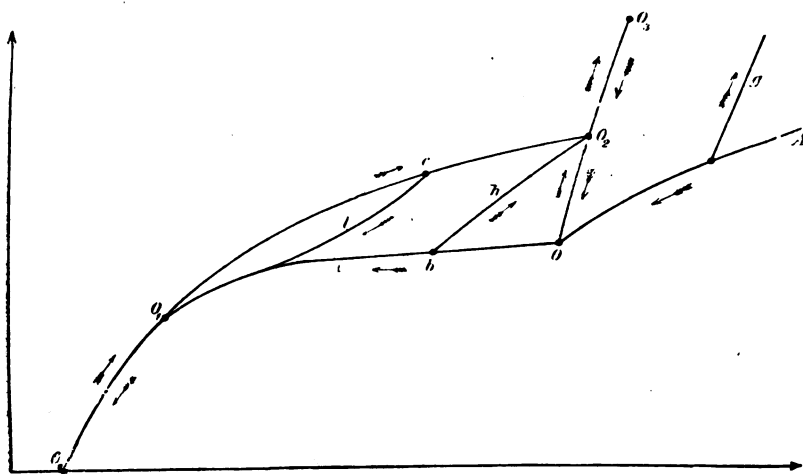



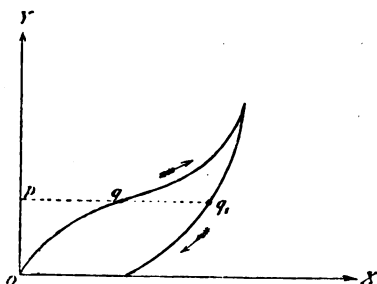
Fig. 26.

resultati degli studî sopra l'acido silicico sono esposti nel diagramma schematico della figura 26. La curva è l'isoterma delle tensioni di vapore corrispondenti a quantità variabili di acqua contenuta nell'idrogelo, e fu determinata sperimentalmente ponendo questo in essiccatori che contenevano acido solforico il cuititolo e quindi la tensione di vapore veniva determinata all'equilibrio e prima della esperienza. Una distillazione avveniva e l'equilibrio era raggiunto quando il peso del colloide era costante.

Le curve insegnano che, per certi tratti, il fenomeno di disidratazione e quello inverso dell'idratazione sono reversibili; per certi valori della concentrazione invece le cose non sono così semplici e

si hanno dei cicli che fanno ricordare, qualitativamente almeno, i cicli d'isteresi magnetica (fig. 27).

Fig. 27.

Un tale comportamento si riscontra pure in altri colloidi, come l'idrato ferrico, il quale dunque non è, allo stato d'idrogelo, un composto chimico definito. Le tensioni di vapore non dipendono forse solo dalla quantità d'acqua effettivamente contenuta nel *gel*, ma dal rapporto fra l'acqua legata chimicamente e quella di assorbimento. Questa ipotesi che i fatti non contraddicono, anzi sembrano legittimare, fa vedere quanto sia difficile una teoria di questi fenomeni.

ANTONIO GARBASSO

GEOMETRIA E CINEMATICA DEL FENOMENO DI ZEEMAN

§ 1. — *Forza elettrica nel campo magnetico.* — Se si sposta un corpo conduttore in un campo magnetico si sviluppano in esso le correnti di Foucault, che, secondo il principio di Lenz, tendono ad ostacolare il movimento che le ha prodotte.

L'esperienza si fa nel miglior modo impiegando un cubo costruito con tanti fogli quadrati sopraposti di lamina di rame e di cartoncino. Il sistema è mantenuto coerente con una legatura di filo metallico, che ha due anellini, A e B, ai centri di due facce contigue.

Noi sospendiamo con un filo di bozzolo il cubo per gli anelli A e B, alternativamente, e lo disponiamo fra i poli affacciati (secondo una retta orizzontale) di un grande elettromagnete di Faraday. Torciamo il filo girando il cubetto con la mano e poi lo abbandoniamo, permettendo dunque alla sospensione di svolgersi e di riprendere lo stato iniziale.

Nell'un caso (fogli orizzontali) il moto continua libero fino in fondo, nell'altro (fogli verticali) il cubo è costretto quasi subito a fermarsi.

Si possono formulare questi resultati dicendo che, nelle condizioni della nostra esperienza, la forza elettromotrice indotta appare verticale, o che, in altre parole, è perpendicolare in ogni punto al piano determinato dal campo magnetico e dalla velocità della materia.

Sul senso della forza in quistione non possiamo per il momento concludere nulla. Ma resta a vedere se non vi sia mezzo di dedurre per altra via un resultato positivo.

Il Prof. Battelli e il Prof. Magri hanno accennato nelle loro conferenze all'ipotesi degli elettroni, e alla teoria che se ne ricava su la costituzione della materia ponderale, teoria che fu svolta nel modo più rigoroso e conseguente da J. J. Thomson.

Suppone il Thomson che gli atomi materiali siano costituiti da una sfera di elettricità positiva, nella quale sfera sarebbero inglo-

bate le particelle negative (elettroni). Il Thomson ammette ancora che nei singoli sistemi la carica complessiva sia nulla.

Ciò posto, egli dimostra, con considerazioni che mi è pur troppo impossibile riferire, che dei varii atomi si danno tre categorie differenti.

Alcuni sono stabili già nello stato neutro, altri ottengono la massima stabilità perdendo o acquistando un certo numero di elettroni, e caricandosi così di elettricità positiva o di negativa.

Gli atomi della prima categoria si possono considerare come modelli dei gas nobili, quelli della seconda e della terza come imagini dei metalli e dei metalloidi rispettivamente; dei metalli e dei metalloidi in quanto, raggiunta la stabilità, si dovranno portare, nell'elettrolisi, al catodo o all'anodo.

Così si intenderebbe che i metalli funzionino più propriamente come conduttori dell'elettricità. Perchè nella massa metallica sarebbero libere sempre delle particelle elettrizzate, delle particelle dunque capaci di rispondere agli stimoli delle forze elettromotrici.

Che se il trasporto avviene, come l'esperienza dimostra, in una direzione determinata, la cosa dovrà attribuirsi alla maggiore mobilità degli elettroni, in confronto dei nuclei residui. La corrente appare in questa ipotesi come un fenomeno convettivo, e gli elettroni ne sono il veicolo; la forza elettromotrice è una forza che agisce sopra di essi e, sensibilmente, sopra di essi soltanto.

Tornando alle nostre esperienze le enunceremo dunque dicendo che « *se un elettrone si muove nel campo magnetico, è soggetto ad* « *un'azione normale al campo e alla velocità dell'elettrone medesimo* ».

Ma i raggi catodici sono costituiti, come è noto, da sciami di particelle negative e però ci dobbiamo aspettare che il loro comportamento permetta di arrivare a qualche nuovo resultato interessante.

In realtà, ripetendo l'esperienza della figura 6, si dimostra con tutta sicurezza

a) che la prima conclusione (su la direzione della forza) continua sempre a valere;

b) che il senso della forza elettrica cambia col senso della velocità e del campo magnetico.

Questa forza elettrica, che si viene così a constatare, sarà, come ogni altra, proporzionale alla carica su la quale si esercita. E quindi se con $L \,.\, M \,.\, N$ si indicano le componenti del campo magnetico,

con $\alpha . \beta . \gamma$ le componenti della velocità, con $-e$ la carica dell'elettrone, con $X . Y . Z$ le componenti della forza che lo sollecita, potremo scrivere senz'altro

$$(1) \qquad \left\{ \begin{array}{l} X = \pm A e \, (M \gamma - N \beta) , \\ Y = \pm A e \, (N \alpha - L \gamma) , \\ Z = \pm A e \, (L \beta - M \alpha) ; \end{array} \right.$$

nelle quali equazioni A è un coefficente numerico, il cui valore dipende dalle unità di misura [1].

Le (1) s'accordano con i resultati sperimentali, perchè se ne ricava subito

$$\begin{array}{c} X L + Y M + Z N = 0 , \\ X\alpha + Y \beta + Z \gamma = 0 , \end{array}$$

mentre è facile constatare che il vettore $(X . Y . Z)$ si inverte col campo $(L . M . N)$ e la velocità $(\alpha . \beta . \gamma)$.

La scelta del segno nel secondo membro delle (1) dipende dal sistema di assi che si assume.

Prendiamo gli assi in modo che un osservatore avente i piedi nell'origine, e la testa dalla parte delle z positive, abbia la y positiva alla destra, quando guarda dalla parte delle x positive.

Ora l'esperienza dimostra che se un raggio catodico procede verso le x positive e il campo magnetico è diretto verso le z positive, allora, nelle nostre ipotesi, il raggio viene deviato verso le y negative.

Ma la seconda delle (1) fornisce in tal caso

$$Y = \pm A e N \alpha ,$$

e dunque il segno da scegliere è l'inferiore.

Sicchè le (1) vanno scritte propriamente

$$(1') \qquad \left\{ \begin{array}{l} X = - A e \, (M \gamma - N \beta) , \\ Y = - A e \, (N \alpha - L \gamma) , \\ Z = - A e \, (L \beta - M \alpha) ; \end{array} \right.$$

e è la carica dell'elettrone *in valore assoluto* [2].

---

[1] Se le grandezze elettriche $(X . Y . Z . e)$ si misurano nel sistema elettrostatico, le grandezze magnetiche $(L . M . N)$ nel sistema elettromagnetico, A è il reciproco della velocità della luce nell'etere libero (nel vuoto).

[2] E' appena necessario avvertire che il ragionamento del testo dimostra bensì che le (1') sono accettabili, ma non permette di concludere che esse siano le sole espressioni accettabili per le $X . Y$ e Z; la cosa risulta da altre esperienze, su le quali non è qui il caso di insistere.

§ 2. — *Moto di un elettrone non perturbato.* — Torniamo per un momento alla teoria del Thomson su la costituzione della materia, e consideriamo il caso più semplice di un atomo fornito di un solo elettrone.

Sia e la carica di questo (e del nucleo), sia ρ la densità cubica della distribuzione positiva, R il raggio della sfera che la contiene, r la distanza fra l'elettrone e il centro al tempo t.

La forza ($\mathfrak{E}$) che sollecita la particella negativa verso la posizione di equilibrio, sarà, come si vede subito,

$$\mathfrak{E} = -\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho \cdot \frac{e}{r^2},$$

$$= -\frac{e^2}{R^3} r.$$

Le sue componenti si scrivono dunque

$$(2) \qquad \begin{cases} X = -\dfrac{e^2}{R^3} x, \\ Y = -\dfrac{e^2}{R^3} y, \\ Z = -\dfrac{e^2}{R^3} z, \end{cases}$$

e le equazioni del moto prendono la forma

$$(3) \qquad \begin{cases} \ddot{x} + k^2 x = 0, \\ \ddot{y} + k^2 y = 0, \\ \ddot{z} + k^2 z = 0, \end{cases}$$

nelle quali si è posto

$$k^2 = \frac{e^2}{m R^3},$$

indicandosi con m la massa dell'elettrone.

Dalle (3) risulta immediatamente

$$(4) \qquad \begin{cases} x = a_1 \sin(kt + \gamma_1), \\ y = a_2 \sin(kt + \gamma_2), \\ z = a_3 \sin(kt + \gamma_3), \end{cases}$$

dove le $a_1 . a_2 . a_3 . \gamma_1 . \gamma_2 . \gamma_3$ sono costanti arbitrarie.

Poniamo adesso

$$(5) \qquad \begin{cases} x_1 = a_2 a_3 \sin(\gamma_2 - \gamma_3), \\ y_1 = a_3 a_1 \sin(\gamma_3 - \gamma_1), \\ z_1 = a_1 a_2 \sin(\gamma_1 - \gamma_2), \end{cases}$$

moltiplichiamo ordinatamente le (4) per le (5) e sommiamo membro a membro; verrà

$$xx_1 + yy_1 + zz_1 = a_1\,a_2\,a_3 \sin kt \,.\, \begin{vmatrix} \cos\gamma_1 & \cos\gamma_2 & \cos\gamma_3 \\ \sin\gamma_1 & \sin\gamma_2 & \sin\gamma_3 \\ \cos\gamma_1 & \cos\gamma_2 & \cos\gamma_3 \end{vmatrix}$$

$$+ a_1\,a_2\,a_3 \cos kt \,.\, \begin{vmatrix} \sin\gamma_1 & \sin\gamma_2 & \sin\gamma_3 \\ \sin\gamma_1 & \sin\gamma_2 & \sin\gamma_3 \\ \cos\gamma_1 & \cos\gamma_2 & \cos\gamma_3 \end{vmatrix} ,$$

$$= 0 \,;$$

« *l'elettrone si muove in un piano normale al vettore* $(x_1 \,.\, y_1 \,.\, z_1)$.

Scegliendo questo piano come piano (x, y) si mettono le (4) sotto la forma

$$\text{(6)} \qquad \left\{ \begin{array}{l} x = a_1 \sin(kt + \gamma_1)\,, \\ y = a_2 \sin(kt + \gamma_2)\,, \\ z = 0\,, \end{array} \right.$$

e da queste, eliminando il tempo, si ricava

$$a_1^2\,a_2^2 \sin^2(\gamma_1 - \gamma_2) = a_2^2\,x^2 - 2a_1\,a_2 \cos(\gamma_1 - \gamma_2) \,.\, xy + a_1^2\,y^2 \,,$$

e girando opportunamente gli assi

$$\text{(7)} \qquad \frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{a_2^2} = 1 \,.$$

« *La trajettoria dell'elettrone è un'ellissi, col centro nel centro della sfera positiva* ».

Quando la trajettoria prende la forma (7) è

$$\gamma_1 - \gamma_2 = \mp \frac{\pi}{2} \,,$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \pm \frac{\pi}{2} \,,$$

e se, come è sempre lecito supporre,

$$\gamma_1 = \frac{\pi}{2} \,,$$

viene subito

$$\gamma_2 = \left\{ \begin{array}{l} \pi \\ 0 \end{array} \right. .$$

Le (6) allora diventano

$$\text{(8)} \qquad \left\{ \begin{array}{l} x = a_1 \cos kt\,, \\ y = \mp a_2 \sin kt\,, \\ z = 0\,. \end{array} \right.$$

§ 3. — ***Rappresentazione cinematica del moto armonico ellittico.*** — Le equazioni (8) si possono scrivere manifestamente sotto la forma

$$
(9)\qquad \begin{cases} x = \dfrac{a_1 + a_2}{2} \cos kt + \dfrac{a_1 - a_2}{2} \cos kt \,, \\ y = \mp \left(\dfrac{a_1 + a_2}{2} \sin kt - \dfrac{a_1 - a_2}{2} \sin kt \right) \,, \\ z = 0 \,. \end{cases}
$$

« *Un moto armonico ellittico risulta dalla sopraposizione di due* « *moti circolari, uniformi, inversi, di ugual periodo, e di raggi* $(a_1 + a_2)/2$ « *e* $(a_1 - a_2)/2$ ».

Se poi, in particolare, si fa

$$a_2 = 0$$

segue dalle (8) e (9) che

« *Un moto armonico rettilineo risulta dalla sopraposizione di due* « *moti circolari, uniformi, inversi, di ugual periodo e di ugual raggio* « $(a_1/2)$ ».

Questi teoremi si verificano agevolmente col piccolo apparecchio

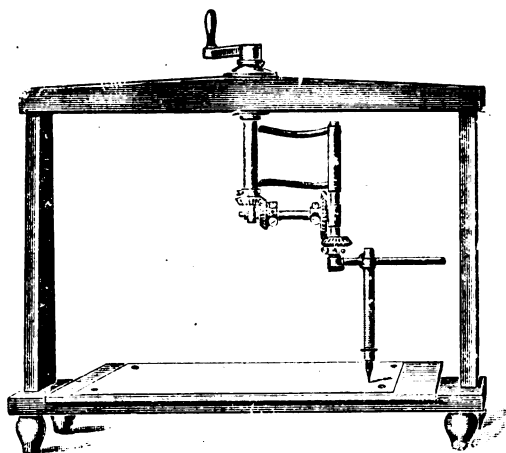



Fig. 28.

della figura 28, la disposizione del quale si ricava anche meglio dal diagramma seguente (fig. 29).

Un tubo d'acciaio, fissato con due viti, per il colletto *c c*, al sostegno *A B*, reca in basso un pignone (fisso) *s s*. Nel suo interno gira a sfregamento dolce l'asse verticale *a a*, comandato dalla manovella *M*; mentre all'esterno vi è ancora un manicotto *m m* (libero), che

per mezzo di due traverse t e t' reca un secondo manicotto $n\,n$. Dentro questo può girare l'altro asse verticale $b\,b$, al quale è unito rigidamente il pignone $r\,r$.

L'asse orizzontale $o\,o$ si salda con un estremo ad $a\,a$ e all'altro estremo è sorretto da un manicotto infilato sopra $b\,b$. Al tubo $u\,u$ girante intorno ad $o\,o$, sono fissati i pignoni $z\,z$ ed $R\,R$.

Finalmente, l'asse $b\,b$ porta ancora un'asta orizzontale $v\,v$, che regge a sua volta la matita $l\,l$.

I pignoni $s\,s$ e $z\,z$ hanno in ogni caso lo stesso numero di denti, e quindi la stessa velocità angolare.

Ciò posto, se la ruota $R\,R$ ha $2\,d$ denti, e la $r\,r$ ne ha d, è facile persuadersi che le velocità angolari dei due moti circolari (inversi) risulteranno identiche in ogni istante.

In realtà la matita $l\,l$ traccia in queste condizioni un'ellissi, o

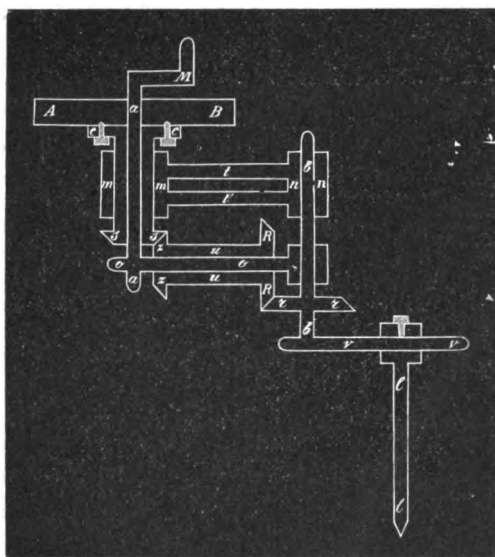



Fig. 29.

in particolare, una retta, se i raggi dei due cerchi componenti risultano uguali.

§ 4. — *Il fenomeno di Zeeman.* — Supponiamo adesso che l'*atomo* del paragrafo secondo venga a trovarsi in un campo magnetico ($L.\,M.\,N$).

Le equazioni (3) prenderanno la nuova forma

$$(10)\qquad \left\{\begin{aligned} \ddot{x} + k^2 x + h(\mathrm{M}\dot{z} - \mathrm{N}\dot{y}) &= 0\,, \\ \ddot{y} + k^2 y + h(\mathrm{N}\dot{x} - \mathrm{L}\dot{z}) &= 0\,, \\ \ddot{z} + k^2 z + h(\mathrm{L}\dot{y} - \mathrm{M}\dot{x}) &= 0\,, \end{aligned}\right.$$

essendosi posto per brevità di scrittura

$$h = \frac{\mathrm{A}e}{m}\,.$$

Le (10), con simboli noti, diventano

$$\left\{\begin{aligned} (\mathrm{D}^2 + k^2)x - h\mathrm{ND}y + h\mathrm{MD}z &= 0\,, \\ + h\mathrm{ND}x + (\mathrm{D}^2 + k^2)y - h\mathrm{LD}z &= 0\,, \\ - h\mathrm{MD}x + h\mathrm{LD}y + (\mathrm{D}^2 + k^2)z &= 0\,, \end{aligned}\right.$$

e forniscono

$$\begin{vmatrix} \mathrm{D}^2 + k^2 & -h\mathrm{ND} & +h\mathrm{MD} \\ +h\mathrm{ND} & \mathrm{D}^2 + k^2 & -h\mathrm{LD} \\ -h\mathrm{MD} & +h\mathrm{LD} & \mathrm{D}^2 + k^2 \end{vmatrix} = 0\,,$$

ossia

$$(\mathrm{D}^2 + k^2)\left[\mathrm{D}^4 + (2k^2 + h^2\mathfrak{M}^2)\mathrm{D}^2 + k^4\right] = 0\,,$$

con

$$\mathfrak{M}^2 = \mathrm{L}^2 + \mathrm{M}^2 + \mathrm{N}^2\,.$$

I *periodi proprii* del sistema sono dunque

$$\left\{\begin{aligned} \mathrm{T}^*,\ \mathrm{T}^{**} &= 2\pi\sqrt{\frac{2}{2k^2 + h^2\mathfrak{M}^2 \mp \sqrt{4h^2k^2\mathfrak{M}^2 + h^4\mathfrak{M}^4}}}\,, \\ \mathrm{T} &= \frac{2\pi}{k}\,, \end{aligned}\right.$$

o, se si conservano solamente i termini di primo grado in $h\mathfrak{M}$,

$$\left\{\begin{aligned} \mathrm{T}^*,\ \mathrm{T}^{**} &= \mathrm{T}\left(1 \pm \frac{h\mathfrak{M}}{2k}\right)\,, \\ \mathrm{T} &= \frac{2\pi}{k}\,. \end{aligned}\right.$$

« *Vi sono tre periodi in luogo di uno solo, il terzo, T, ha con-*
« *servato il valore antico, T* è un poco più grande e T** un poco più*
« *piccolo di esso* ».

Per intendere come la cosa sia avvenuta imaginiamo di riferire il movimento dell'elettrone non perturbato a tre assi scelti in modo particolare. E cioè la z sia secondo la direzione che avranno più tardi le linee di forza magnetica, x e y stiano nel piano normale.

Il moto secondo z è armonico, col periodo T, il moto nel piano $(x \cdot y)$ è armonico esso pure, ellittico, in generale, ed ha sempre il periodo T.

Sarà, quando si eccita il campo,

$$L = M = 0 \;,$$
$$N = \mathfrak{M} \;,$$

e dunque, per le (1'), il movimento secondo z continua indisturbato, mentre sull'altro agiscono le forze

$$X = + A e N \dot{y} \;,$$
$$Y = - A e N \dot{z} \;.$$

Se ora quest'ultimo moto si imagina risolto nei due circolari inversi che gli equivalgono è chiaro che dei due uno sarà accelerato e l'altro ritardato.

« *La proiezione della trajettoria nel piano* $(x \cdot y)$ *si ottiene adesso* « *componendo due moti circolari inversi di raggi* (*in generale*) *e di pe-* « *riodi differenti* ».

Se in luogo di T^*, T^{**} e T si introducono le frequenze, se cioè si pone

$$n^* = \frac{1}{T^*} \;, \qquad n^{**} = \frac{1}{T^{**}} \;, \qquad n = \frac{1}{T} \;,$$

verrà subito

$$n^* \,.\, n^{**} = n \left(1 \mp \frac{h \mathfrak{M}}{2k}\right) \;,$$

o, facendo

$$n' = \frac{h \mathfrak{M}}{2k} n \;,$$

$$n^* , n^{**} = n \mp n' \;;$$

e dunque il moto perturbato si rappresenta, ove si scelgano opportunamente gli assi x e y, con le equazioni

$$\text{(11)} \qquad \left\{ \begin{aligned} x &= c_1 \cos 2\pi (n - n') t + c_2 \cos 2\pi (n + n') t \;, \\ y &= c_1 \sin 2\pi (n - n') t - c_2 \sin 2\pi (n + n') t \;, \end{aligned} \right.$$

$$\text{(12)} \qquad z = c_3 \sin (2\pi n t + \gamma) \;.$$

§ 5. — *Interpretazione cinematica del fenomeno di Zeeman.* — Occupiamoci per il momento delle (11) soltanto. Esse si possono scrivere

$$\left\{ \begin{aligned} x &= (c_1 + c_2) \cos 2\pi n t \cos 2\pi n' t + (c_1 - c_2) \sin 2\pi n t \sin 2\pi n' t \;, \\ y &= (c_1 - c_2) \sin 2\pi n t \cos 2\pi n' t - (c_1 + c_2) \cos 2\pi n t \sin 2\pi n' t \;, \end{aligned} \right.$$

e sono dunque della forma

$$\begin{cases} x = \xi \cos \varphi + \eta \sin \varphi \ , \\ y = \eta \cos \varphi - \xi \sin \varphi \ , \end{cases}$$

con

$$\begin{cases} \xi = (c_1 + c_2) \cos 2\pi n t \ , \\ \eta = (c_1 - c_2) \sin 2\pi n t \ . \end{cases}$$

e

$$\varphi = 2\pi n' t \ .$$

« *Mentre l'elettrone descrive di moto armonico con la frequenza n* « *la sua trajettoria ellittica, questa gira uniformemente nel piano con* « *la frequenza n'* ».

Passando a coordinate polari le (11) forniscono

$$(13) \qquad \begin{cases} \rho^2 = c_1^2 + c_2^2 + 2c_1 c_2 \cos 4\pi n t \ , \\ \operatorname{tg} \theta = \dfrac{c_1 \sin 2\pi (n - n') t - c_2 \sin 2\pi (n + n') t}{c_1 \cos 2\pi (n - n') t + c_2 \cos 2\pi (n + n') t} \ ; \end{cases}$$

e dalla prima di queste segue anzitutto che la traiettoria risultante è compresa fra due circonferenze di cerchio, con i raggi

$$c_1 + c_2$$

e

$$c_1 - c_2 \ .$$

Il raggio vettore diventa massimo per

$$t = \frac{H}{2n} \ ,$$

con H intero, vale a dire ad ogni mezza rivoluzione del punto che descrive l'ellissi.

La trajettoria è formata di tante *foglie* identiche e simmetriche, delle quali è facile determinare il numero, quando sia razionale il rapporto n/n'. Durante una rivoluzione intera l'ellissi gira di

$$\frac{2\pi n'}{n} \ ,$$

tra una foglia e la seguente vi è dunque l'angolo

$$\frac{\pi (n + n')}{n} \ ,$$

e però il numero delle foglie è dato dal valore intero di H, che verifica la

$$\frac{n + n'}{n} = \frac{2K}{H} \ ,$$

in corrispondenza della più piccola K intera. Se ne conclude che la curva avrà n foglie semplici, quando n e n' sono numeri dispari; ne avrà $2n$ se uno è dispari e l'altro è pari.

Per descrivere queste linee con l'apparecchio della figura 28 basta prendere il numero di denti della ruota RR diverso dal doppio dei denti della ruota rr.

Essendo, per fissare le idee, $2d-\delta$ il numero scelto per la RR, e d quello relativo ad rr, verrà subito

$$\frac{d-\delta}{d}=\frac{n-n'}{n+n'}\,.$$

Sia, ad esempio,

$$d=24\ ,$$
$$\delta=3\ ,$$

verrà

$$\frac{n-n'}{n+n}=\frac{21}{24}=\frac{15-1}{15+1}\ ;$$

la trajettoria del moto resultante ha 15 foglie (fig. 30).

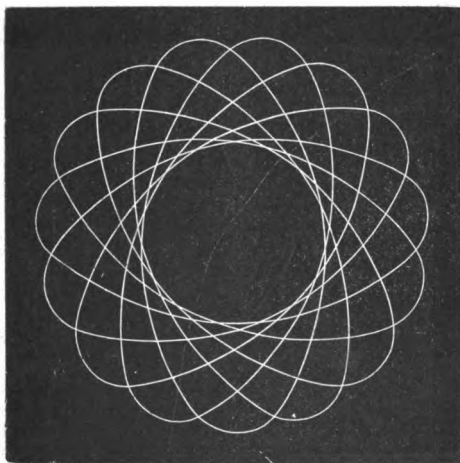



Fig. 30.

Se fosse invece

$$d=17\ ,$$
$$\delta=4\ ,$$

verrebbe

$$\frac{n-n'}{n+n'}=\frac{13}{17}=\frac{15-2}{15+2}\ ,$$

e la trajettoria del moto resultante avrebbe 30 foglie (fig. 31).

§ 6. — *Equazione della trajettoria projettata nel piano normale alle linee di forza.* — Dalle (11), eliminando il tempo, si ricava facilmente l'equazione della trajettoria, projettata nel piano (x, y).

Ponendo

$$\begin{cases} 2\pi(n - n') = r , \\ 2\pi(n + n') = s , \end{cases}$$

viene subito

$$\begin{cases} x = c_1 \cos r t + c_2 \cos s t , \\ y = c_1 \sin r t - c_2 \sin s t , \end{cases}$$

e da queste

$$\begin{cases} x + iy = c_1 e^{irt} + c_2 e^{-ist} , \\ x - iy = c_1 e^{-irt} + c_2 e^{ist} , \end{cases}$$

e in coordinate polari

$$\begin{cases} \rho e^{i\theta} = c_1 e^{irt} + c_2 e^{-ist} , \\ \rho e^{-i\theta} = c_1 e^{-irt} + c_2 e^{ist} , \end{cases}$$

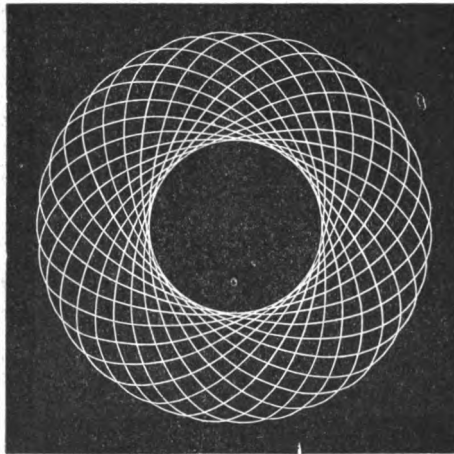



Fig. 31.

e con le posizioni

$$(14) \qquad \begin{cases} e^{irt} = u , \\ e^{-ist} = v , \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho e^{i\theta} = c_1 u + c_2 v , \\ \rho e^{-i\theta} = \dfrac{c_1}{u} + \dfrac{c_2}{v} . \end{cases}$$

Si ricava di qui

$$\left\{\begin{aligned} u &= \frac{\rho^2 + c_1^2 - c_2^2 \pm i\sqrt{4c_1^2\rho^2 - (\rho^2 + c_1^2 - c_2^2)^2}}{2c_1\rho e^{-i\theta}}, \\ v &= \frac{\rho^2 - c_1^2 + c_2^2 \pm i\sqrt{4c_2^2\rho^2 - (\rho^2 - c_1^2 + c_2^2)^2}}{2c_2\rho e^{-i\theta}}. \end{aligned}\right.$$

Osserviamo intanto che è

$$4c_1^2\rho^2 - (\rho^2 + c_1^2 - c_2^2)^2 = 4c_2^2\rho^2 - (\rho^2 - c_1^2 + c_2^2)^2,$$

chiamiamo R^2 il valore comune di queste espressioni, e dalle (14) ricaveremo facilmente

$$\left(\frac{\rho^2 + c_1^2 - c_2^2 - iR}{2c_1\rho e^{-i\theta}}\right)^{-s} = \left(\frac{\rho^2 - c_1^2 + c_2^2 + iR}{2c_2\rho e^{-i\theta}}\right)^{r}, \tag{15}$$

che è l'equazione cercata.

Per liberarla dagli imaginarii poniamo

$$\left\{\begin{aligned} \frac{\rho^2 + c_1^2 - c_2^2 - iR}{2c_1\rho} &= e^{-i\varphi}, \\ \frac{\rho^2 - c_1^2 + c_2^2 + iR}{2c_2\rho} &= e^{i\psi}; \end{aligned}\right.$$

sarà

$$\left\{\begin{aligned} \varphi &= \operatorname{artg} \frac{R}{\rho^2 + c_1^2 - c_2^2} = \operatorname{artg} \alpha, \\ \psi &= \operatorname{artg} \frac{R}{\rho^2 - c_1^2 + c_2^2} = \operatorname{artg} \beta, \end{aligned}\right. \tag{16}$$

e la (15) prenderà la forma

$$e^{is\varphi} = e^{ir\psi} \cdot e^{i(s+r)\theta},$$

dalla quale risulta

$$s\varphi - r\psi = (s+r)\theta,$$

o, per le (16),

$$s \operatorname{artg} \alpha - r \operatorname{artg} \beta = (s+r)\theta. \tag{17}$$

Se si osserva adesso che è

$$\left\{\begin{aligned} \operatorname{tg}(s \operatorname{artg} \alpha) &= \frac{s\alpha - \binom{s}{3}\alpha^3 + \binom{s}{5}\alpha^5 - \dots}{1 - \binom{s}{2}\alpha^2 + \binom{s}{4}\alpha^4 - \dots} = A, \\ \operatorname{tg}(r \operatorname{artg} \beta) &= \frac{r\beta - \binom{r}{3}\beta^3 + \binom{r}{5}\beta^5 - \dots}{1 - \binom{r}{2}\beta^2 + \binom{r}{4}\beta^4 - \dots} = B, \end{aligned}\right.$$

la (17) diventa

$$\text{artg}\, A - \text{artg}\, B = (s + r)\,\theta \ ,$$

e successivamente

$$\text{artg}\, \frac{A - B}{1 + AB} = (s + r)\,\theta \ ,$$

$$\frac{A - B}{1 + AB} = \text{tg}\, (s + r)\,\theta \ ; \tag{18}$$

la quale ultima risolve il problema.

§ 7. — *La trajettoria nello spazio.* — Finora abbiamo studiato anzichè la trajettoria vera, la sua projezione nel piano normale alle linee di forza.

Se si tien conto ancora della componente

$$z = c_3 \sin (2\,\pi n t + \gamma) \ , \tag{12}$$

le foglie della curva (18) (figure 30 e 31) si deformano e vengono ad adagiarsi sopra una superficie, la cui equazione si ottiene eliminando il tempo fra la (12) e la prima delle (13).

Poniamo per brevità

$$2\,\pi\, n t = \tau \ ,$$

e avremo

$$\begin{cases} \rho^2 = c_1^2 + c_2^2 + 2\, c_1\, c_2 \cos 2\,\tau \ , \\ z \ = c_3 \sin (\tau + \gamma) \ , \end{cases}$$

ossia

$$\begin{cases} c_1\, c_2 \left(e^{2i\tau} + e^{-2i\tau} \right) = \rho^2 - \left(c_1^2 + c_2^2 \right) \ , \\ c_3^2 \left(e^{2i\gamma} \,.\, e^{2i\tau} + e^{-2i\gamma} \,.\, e^{-2i\tau} \right) = 2 \left(c_3^2 - 2\, z^2 \right) \ , \end{cases}$$

e quindi

$$e^{2i\tau} = \frac{\begin{vmatrix} \rho^2 - (c_1^2 + c_2^2) & c_1\, c_2 \\ 2\,(c_3^2 - 2\, z^2) & c_3^2\, e^{-2i\gamma} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_1\, c_2 & c_1\, c_2 \\ c_3^2\, e^{2i\gamma} & c_3^2\, e^{-2i\gamma} \end{vmatrix}} \ ,$$

$$e^{-2i\tau} = \frac{\begin{vmatrix} c_1\, c_2 & \rho^2 - (c_1^2 + c_2^2) \\ c_3^2\, e^{2i\gamma} & 2\,(c_3^2 - 2\, z^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} c_1\, c_2 & c_1\, c_2 \\ c_3^2\, e^{2i\gamma} & c_3^2\, e^{-2i\gamma} \end{vmatrix}} \ ,$$

e moltiplicando membro a membro

$$\begin{vmatrix} c_1 c_2 & c_1 c_2 \\ c_3^2 e^{2i\gamma} & c_3^2 e^{-2i\gamma} \end{vmatrix}^2 =$$

$$\begin{vmatrix} \rho^2 - (c_1^2 + c_2^2) & c_1 c_2 \\ 2(c_3^2 - 2z^2) & c_3^2 e^{-2i\gamma} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} c_1 c_2 & \rho^2 - (c_1^2 + c_2^2) \\ c_3^2 e^{2i\gamma} & 2(c_3^2 - 2z^2) \end{vmatrix},$$

che è appunto l'equazione cercata.

Svolgendo e riducendo si trova

$$\begin{aligned} 4 c_1^2 c_2^2 c_3^4 \sin^2 2\gamma = c_3^4 \left[\rho^2 - (c_1^2 + c_2^2)\right]^2 + 4 c_1^2 c_2^2 (c_3^2 - 2z^2)^2 \\ - 4 c_1 c_2 c_3^2 \left[\rho^2 - (c_1^2 + c_2^2)\right] (c_3^2 - 2z^2) \cos 2\gamma \,. \end{aligned} \tag{19}$$

La superficie (19) è in generale di quarto ordine.

In casi particolari assume però delle forme ancora più semplici.

Facendo

$$\gamma = \begin{cases} 0 \\ \dfrac{\pi}{2} \end{cases},$$

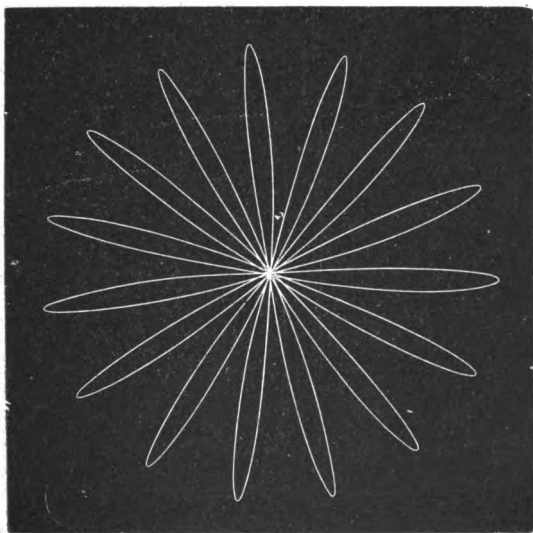



Fig. 32.

risulta infatti

$$c_3^2 \rho^2 \pm 4 c_1 c_2 z^2 = c_3^2 (c_1 \pm c_2)^2 \,. \tag{20}$$

Al segno superiore corrisponde un ellissoide di rivoluzione (intorno all'asse z) all'inferiore un iperboloide ad una falda, pure di rivoluzione (intorno al medesimo asse).

§ 8. — *Il caso delle vibrazioni rettilinee.* — Un problema particolare, che si lascia trattare con la massima facilità, è quello in cui la vibrazione non perturbata si suppone rettilinea.

Questo problema dipende dalle equazioni

$$(11') \quad \begin{cases} x = c\cos 2\pi(n-n')t + c\cos 2\pi(n+n')t\ , \\ y = c\sin 2\pi(n-n')t - c\sin 2\pi(n+n')t\ , \end{cases}$$

$$(12') \qquad z = d\cos 2\pi n t\ .$$

La R prende la forma

$$R = \sqrt{4c^2\rho^2 - \rho^4}\ ,$$

ed è, per le (16),

$$(16') \qquad \alpha = \beta = \frac{\sqrt{4c^2-\rho^2}}{\rho}\ .$$

Quindi la (17) diventa

$$(17') \qquad (s-r)\,\mathrm{artg}\frac{\sqrt{4c^2-\rho^2}}{\rho} = (s+r)\,\theta\ ,$$

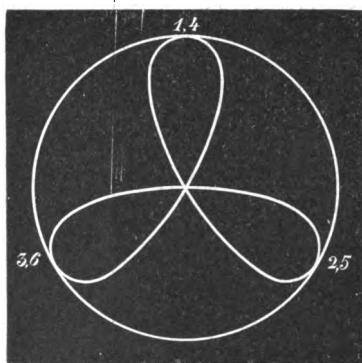



Fig. 33.

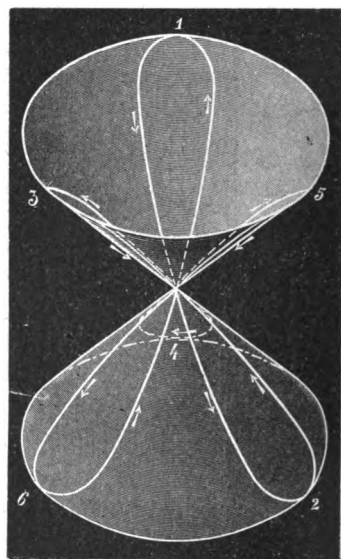



Fig. 34.

e fornisce successivamente

$$\mathrm{artg}\frac{\sqrt{4c^2-\rho^2}}{\rho} = \frac{s+r}{s-r}\,\theta\ ,$$

$$\frac{\sqrt{4c^2-\rho^2}}{\rho} = \mathrm{tg}\,\frac{s+r}{s-r}\,\theta\ ,$$

$$\rho = 2c\cos\frac{s+r}{s-r}\,\theta\ ,$$

e, per la definizione di r e di s,

$$\rho = 2c \cos \frac{n}{n'} \theta \quad . \tag{21}$$

La (21) è l'equazione caratteristica di una curva che fu descritta da Guido Grandi nel 1728 e distinta da lui col nome di *Rodonea*.

Si può chiamare convenientemente *Rodonea dispari* quella che ha un numero dispari di foglie e *Rodonea pari* quella che risulta di un numero pari.

La figura 32 rappresenta una Rodonea dispari ($n = 15$, $n' = 1$).

Anche la superfice (19) prende nel caso attuale una forma estremamente semplice.

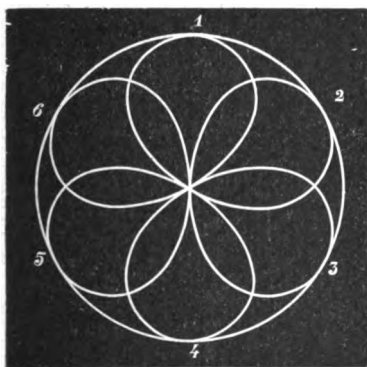



Fig. 35.

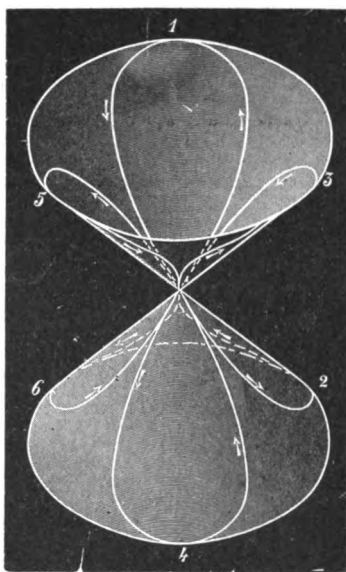



Fig. 36.

Basterà per ottenerla scegliere nella (20) i segni inferiori, ponendo ancora

$$c_1 = c_2 = c \ ,$$
$$c_3 = d \ ;$$

risulta dunque

$$d^2 \rho^2 - 4 c^2 z^2 = 0 \ , \tag{22}$$

che è l'equazione di un cono circolare.

La curva risultante è formata in ogni caso da $2n$ foglie, che si adagiano per metà su la falda positiva del cono e per l'altra metà su la falda negativa.

Se la projezione sul piano $z = 0$ è una Rodonea dispari, le foglie negative sdoppiano le positive; se è una Rodonea pari, le foglie positive e le negative si alternano.

La curva (21, 22) potrebbe indicarsi col nome di *Rodonea conica.*

Dalla Rodonea dispari della figura 33 ($n = 3$, $n' = 1$) si genera ad esempio la Rodonea conica della figura 34; e dalla Rodonea pari della figura 35 ($n = 3$, $n' = 2$) nasce la Rodonea conica della figura 36.

LUIGI PUCCIANTI

I PROGRESSI RECENTI DELL' ANALISI SPETTRALE

Il compito mio, o signori, non è quello di mettervi sott'occhio un quadretto riassuntivo delle cognizioni da tempo e definitivamente acquistate coll'aiuto dello spettroscopio, e già ordinate in forma di disciplina, sibbene quello (in vero, temo, troppo difficile per me) di condurvi un poco al limite attuale tra ciò che è stato conquistato recentemente, e ciò su cui presentemente si appunta il desiderio di conquista delle menti scientifiche; e fattavi gettare un'occhiata sui campi appena esplorati, dei quali non è ancora possibile apprezzare giustamente la fertilità, indicarvi le vie che guideranno verso regioni per ora ignote. Diverse vie, le quali partendosi da luoghi lontani e separati, promettono, non già di sperdersi divergendo sempre più, ma di convergere anzi decisamente verso una qualche regione che noi speriamo singolarmente ricca e feconda.

§ 1. — *Emissione, assorbimento, dispersione anomala di una riga.* — Ma, per seguire il meglio possibile tal compito, mi sarà prudente consiglio di prendere le mosse da qualche punto preciso e ben determinato, voglio dire di cominciare col ripetere innanzi a voi, signori, alcuni esperimenti, i quali servano a manifestare in tre modi diversi, entro un certo corpo aeriforme, una particolare costituzione, che in termine spettroscopico si chiama la esistenza di una *riga*.

Osservate questa piccola fiamma in cui arde misto all'aria il gas illuminante, dopo esser passato sopra un poco di sodio fortemente riscaldato portando seco il vapore che se ne svolge. Essa vi mostra, appunto per effetto del sodio, una viva colorazione gialla, e se faccio passare la sua luce per una sottile fenditura, e con un prisma e una lente ne proietto su questo schermo lo *spettro puro*, voi (o almeno i più vicini di voi) potete verificare che esso è costituito appunto da una riga gialla: *riga di emissione.* La luce emessa dal sodio, *in queste condizioni*, è dunque monocromatica, cioè corrisponde a

oscillazioni di un sol periodo, o almeno di periodi pochissimo diversi tra loro. Invero con uno strumento ottico più potente riusciremmo a vedere che sono due righe assai vicine formanti una *riga doppia*. Ma di ciò ora non ci occupiamo. Facciamo invece un segno sullo schermo al posto che occupa la riga, e mandiamo attraverso alla fiamma la luce del cratere positivo di una lampada ad arco; ed ecco che appare con vivo splendore lo spettro dal rosso al violetto, completo, salvochè interrotto da una riga oscura occupante proprio la posizione segnata dalla luminosa poco fa.

Non bisogna credere che questa non vi sia tuttora, non vi è invero nessuna ragione perchè sia scomparsa, non avendo io mutato niente, nè della fiamma, nè degli strumenti ottici che sono sulla via della luce tra essa e lo schermo. La riga spicca in nero solo perchè il suo splendore è ora inapprezzabile rispetto a quello del restante spettro.

In questa seconda esperienza voi osservate la stessa riga come *riga invertita;* è l'esperienza dell' inversione dello spettro, e ci dice che « mentre la fiamma con sodio non intercetta minimamente le oscillazioni luminose di tutti gli altri periodi, intercetta, perchè assorbe, le uguali in periodo a quelle che essa emette ».

Ciò è del resto non proprio del sodio ma generale, è un doppio modo di manifestarsi delle righe; ma prima di illustrarlo vi voglio raccontare che il Kohlrausch (certo a voi noto per gli studii che fece poi sulla conducibilità elettrica delle soluzioni), quando era ancora assistente del prof. Kundt e preparava per lui le lezioni sperimentali, ripetendo questa esperienza osservò una particolarità, che fece notare al maestro, e insieme ne trovarono la interpretazione.

Egli aveva posta la fiamma con sodio non prima della fenditura ma qui ove ora la colloco cioè vicino al prisma; essa aveva già naturalmente una forma tale che presentava diverse grossezze a varie altezze, cioè si poteva, per quel che avviene in un piano verticale, pensare avesse la forma di un prisma collo spigolo orizzontale. Tale forma ho io qui ad arte esagerata, schiacciando la fiammella con questo cartone di amianto; ho in oltre fatta attenzione, affinchè tutto il fascio luminoso la traversasse, di collocarla qui ove (vedete?) esso ha la minima sezione perchè vi si forma l'immagine assai piccola del

cratere positivo, e ho limitato anzi un poco il fascio con un diaframma. Ecco che sullo schermo voi vedete quel che già vide il Kohlrausch, se osservate attentamente gli orli orizzontali dello spettro, che questi cioè non sono più rettilinei in vicinanza della riga nera, ma quando ci si accosta ad essa dalla parte del rosso deviano in alto; dalla parte del violetto, deviano in basso (fig. 37).

Piccola deviazione in vero, quella che voi osservate, più piccola quella che osservò da prima il Kohlrausch, il quale naturalmente non aveva studiato il mezzo atto a renderla più apprezzabile come ho fatto io (valendomi delle indicazioni del prof. Wood di Baltimora), ma bastevole per mostrare ai dotti sperimentatori che essi avevano ripetuta, senza esserselo prefisso, la esperienza dei prismi incrociati (uno dei prismi è la fiamma) quale Christiansen l'usava per istudiare la dispersione anomala delle sostanze colorate, e che appunto l'esperienza aveva rivelato la dispersione anomala del vapore di sodio.

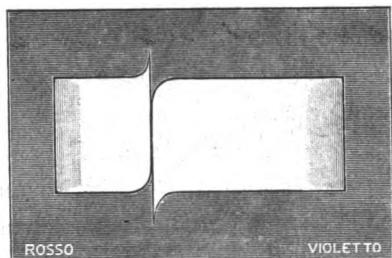



Fig. 37.

Le radiazioni di lunghezze d'onda un poco maggiori di quella caratteristica della riga sono deviate in alto cioè verso la base del prisma, il loro indice di rifrazione sarà dunque singolarmente grande; e quelle di lunghezze d'onda più piccole della caratteristica, sono deviate verso il basso, cioè hanno un indice singolarmente piccolo. L'indice adunque è modificato sensibilmente solo in prossimità della riga: fuori di questa è per ogni dove crescente col decrescere della lunghezza d'onda (come per le ordinarie sostanze trasparenti), ma fa un salto in verso opposto traversando la riga. Sarebbe preferibile la denominazione di *singolarità della dispersione*, a quella ormai consacrata dall'uso, ma poco scientifica, di *dispersione anomala*, prima, perchè anche questo fenomeno ha, come gli altri, le sue leggi che anzi appunto si conoscono assai bene; poi perchè il caso ordinario (o diciamo così *normale*), non diversifica da questo che per essere la singolarità fuori della regione spettrale esplorata.

È bene richiamare la vostra attenzione su ciò, che questa terza esperienza (a differenza delle altre due) ci manifesta l'effetto della

riga in posizioni dello spettro ad essa esterne, ciò che, come vedremo, conferisce in alcun caso, maggior chiarezza ai resultati.

La connessione fra i tre fatti, per quanto diversi tra loro, è evidente. Nessuno di voi anzi può dubitarne: essi non sono che tre modi di manifestarsi di uno stesso stato di cose.

§ 2. — *Cenno teorico.* — La loro teoria matematica deve avere dunque una base comune, ed ecco il quadro sintetico in cui si possono ordinare le trattazioni di molti matematici da Sellmayer, Helmholtz, Ketteler (che per i primi presero la via giusta) al Drude (che precisò meglio il valore di alcuni elementi); le quali trattazioni servono bene a spiegare i tre fatti e la loro connessione. La comunanza di un concetto fondamentale porta una somiglianza anche nella parte analitica di queste trattazioni, mentre le differenze stanno in ipotesi secondarie, nel maggiore o minor grado di approssimazione, nel significato elastico oppure elettromagnetico che si attribuisce agli elementi ipotetici.

Le ipotesi fondamentali sono: la esistenza di sistemi capaci di oscillare pendolarmente con un certo periodo proprio, i quali io soglio chiamare *vibratori*; e l'esistenza di una qualche connessione per cui l'energia dei vibratori possa propagarsi al mezzo, e reciprocamente quella delle oscillazioni del mezzo, comunicarsi ai vibratori. L'insieme delle equazioni differenziali relative ai vibratori ed al mezzo rappresenteranno adunque la *costituzione* di questa fiammella, e sistemi dello stesso tipo, la costituzione di ogni fiamma, arco, scintilla, ecc., cioè di ogni stato della materia capace di produrre righe; ma una arbitrarietà sconfinata rimarrà ancora nella integrazione; tanto più che le equazioni del mezzo continuo sono necessariamente alle derivate parziali, e quindi ammettono nel loro integrale generale funzioni arbitrarie del tempo e delle coordinate spaziali. Questa arbitrarietà corrisponde alla varietà dei fenomeni ottici che si possono produrre nel vapore. Le tre esperienze ora fatte saranno rappresentate da tre integrali particolari.

Per la prima potremo immaginare nell'inizio nulla la energia del mezzo, e i vibratori dotati di una certa energia potenziale. Tradurre ciò in espressione analitica, e determinare la forma dell' integrale particolare corrispondente, sarà svolgere la *teoria della riga di emis-*

sione. L'energia potenziale dei vibratori si trasformerà in energia attuale prima in essi e poi nel mezzo, nel quale allora si propagheranno onde col periodo proprio dei vibratori.

Per rappresentare la seconda esperienza, l'integrale particolare si sceglierà sulla ipotesi di un sistema di onde propagantisi nel mezzo, dotate dello stesso periodo dei vibratori. La energia di queste, comunicandosi ai vibratori mancherà al mezzo, cioè la luce sarà assorbita. Secondo questa linea si svolge la *teoria della riga invertita*.

Ma vedete come fin qui, anche con semplici considerazioni e senza l'ausilio dell'analisi matematica, si può prevedere all'ingrosso il resultato finale della prima e della seconda esperienza.

Invece il resultato della terza non si potrebbe prevedere senza un procedimento analitico piuttosto complicato, che qui non è il caso di riferire. Esso consiste nel discutere gli integrali particolari corrispondenti all'ipotesi di un sistema di onde propagantesi nel mezzo, il cui periodo sia alquanto diverso da quello dei vibratori. Dalla quale discussione analitica risulta, ciò che, dico, non potrei spiegarvi con semplici parole, che l'effetto finale sarà una variazione della velocità di propagazione, e precisamente un relativo acceleramento delle onde di periodo più piccolo, e una ritardazione di quelle di periodo più grande del periodo proprio competente ai vibratori; e che tale variazione decrescerà rapidamente col crescere della differenza tra questo e il periodo dell'onda. Veramente le teorie analitiche dell' Hemholtz, Ketteler, Drude dicono anche più di ciò che a noi serve, e si applicano a casi meno semplici di quello che ci interessa, cioè delle righe, e le espressioni dell'indice sono assai complicate; ma per il caso di una sola riga si riducono alla forma assai spiccia

$$n^2 - N^2 = \frac{P}{\lambda^2 - \lambda_1^2}$$

ove N rappresenta l'indice del vapore fuori della azione della riga λ la lunghezza d'onda della luce che traversa il vapore, e λ_1 quella che corrisponde al periodo caratteristico, ossia quella della riga, e P è un coefficiente che misura l'importanza di questa, e cresce colla densità del vapore.

Se sono presenti più righe, si ha nel secondo membro una somma di termini simili, uno per ciascuna di esse:

$$n^2 - N^2 = \frac{P_1}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{P_2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{P_3}{\lambda^2 - \lambda_3^2} + \cdot \cdot \cdot \cdot$$

cioè l'effetto di esse si sovrappone senza complicarsi. E per la fiamma con sodio in cui, ho detto or ora, è presente una riga doppia, la somma avrà due termini:

$$n^2 - N^2 = \frac{P_1}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{P_2}{\lambda^2 - \lambda_2^2}$$

Debbo qui chiudere questo sommario cenno alla teoria per necessità di tempo, e torno alle esperienze.

§ 3. — *Ricerche recenti sulla dispersione anomala.* — Dei tre modi di manifestarsi di una riga il primo è certo il più facile a osservare, e anche ordinariamente il più sensibile. Per esso è necessaria una somministrazione di energia ai vibratori; e questa ordinariamente avviene (come meglio spiegherò più tardi) per effetto di quegli agenti stessi, che producono in seno del vapore o del gas i vibratori.

Per osservare la riga invertita occorre una certa densità dei vibratori e una sorgente assai intensa che produca il fondo. In questo modo si vedono le righe di molti elementi chimici nel sole, e se ne induce l'esistenza di un involucro detto appunto *strato invertente.* Essendo questo modo di osservazione vincolato alle dette condizioni, e anche per ciò che concerne lo spettroscopio meno sensibile, non deve far meraviglia se molte righe si conoscono per la sola emissione.

Ancor più difficile è, come avrete già intuito, la terza esperienza; anzi il metodo dei prismi incrociati è sufficiente in pochi casi, e solo colla delicatezza del metodo interferenziale si riesce ad osservare e fotografare la singolarità di rifrazione di molte righe. Qui voi vedete uno dei più semplici e pur perfetti apparecchi di interferenza, il rifrattometro di Jamin; esso è fatto di due specchi uguali, assai spessi, posti quasi paralleli fra loro, in modo che il primo separa un fascio

di luce bianca in due, riflessi rispettivamente dalla faccia anteriore e dalla posteriore (fig. 38).

L'altro specchio riconduce il primo fascio, riflesso dalla sua faccia posteriore, a propagarsi insieme col secondo, riflesso sulla anteriore [1]. Così si ottengono le interferenze, e con una lente convergente, posta sul camino dei fasci riuniti, io proietto sulla fenditura verticale dello spettroscopio, le frangie orizzontali, e voi potete, mettendo

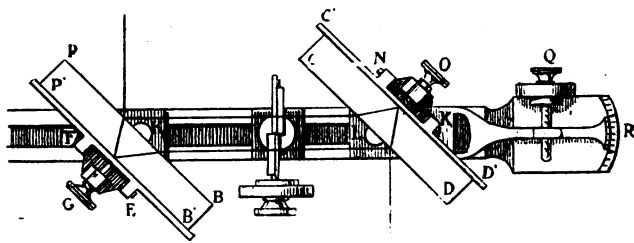



Fig. 38.

l'occhio all'oculare, vedere in esso lo spettro solcato per il lungo, da strie alternativamente chiare e scure, che vanno stringendosi dal rosso, al violetto. Se ora pongo una fiamma di sodio sul cammino di uno dei raggi, ecco, chi sta allo spettroscopio può vedere, nell'intorno della doppia riga le frangie distorcersi e assumere una forma la quale ci descrive l'andamento della rifrazione in quella regione spettrale. Invero le ascisse sono le lunghezze d'onda (essendo lo spettro *normale*), le ordinate sono gli spostamenti delle frangie cioè i ritardi di un fascio rispetto all'altro, proporzionali, come sapete, ai valori che assume l'eccesso dell'indice sull'unità.

E tutti insieme potete comodamente osservare ingrandita sullo schermo delle proiezioni questa fotografia che io feci appunto in tal modo, ma con uno spettroscopio assai più potente di questo.

Essa mostra chiaro il comporsi delle singolarità corrispondenti alle due righe: le misure su essa eseguite si accordano con la espressione di due termini or ora riferita, risultando alquanto maggiore il

---

[1] Sopra un sostegno orizzontale sono disposte due lastre verticali di cristallo, PB e CD, con le facce laterali, $P'B'$ e $C'D'$ argentate.

La PB è inclinata a 45° sul sostegno e si fissa con la vite K; CD può farsi girare con le viti O e Q intorno a due assi ortogonali.

(La figura 38 è tolta dal Chwolson, *Lehrbuch der Physik*, II, pag. 773).

coefficiente di questa riga (la più vicina al violetto) che difatti è la più forte.

Anche l'arco elettrico son riuscito a inserire nel rifrattometro, e osservare le singolarità di dispersione per molte righe del bario, dello stronzio, del calcio, del ferro ecc. Le più notevoli hanno lasciato una traccia chiara in queste fotografie che proietto (fig. 39). Non già per la sola soddisfazione di compiere il quadro teorico e di su-

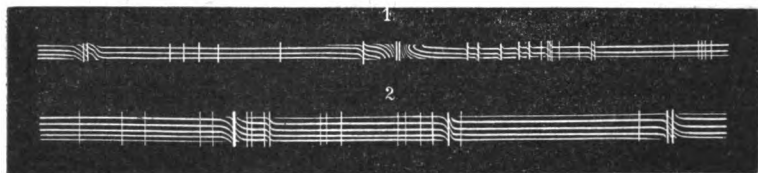



Fig. 39.

perare una difficoltà, io mi sono ingegnato di applicare più estesamente questo terzo modo di studio alle righe spettrali; ma per altre buone ragioni: da prima perchè certe teorie del prof. Julius attribuivano alle singolarità di dispersione una parte capitale in molte apparenze solari, in seguito perchè mi andavo persuadendo, che queste esperienze ci compensano della maggiore difficoltà, dicendoci intorno alla materia studiata qualcosa che invano domanderemmo alle altre.

§ 4. — *Regolarità negli spettri.* — Prima di dirvi brevemente come questo triplice mezzo sperimentale si sia recentemente usato a indagare la costituzione della materia (che è il fine a cui tende il mio discorso), mi è necessario richiamare alcune poche nozioni sulla *regolarità degli spettri* di righe, un argomento, il quale, sebbene da assai tempo familiare agli spettroscopisti, non è per lo più compreso nei libri di fisica generale. La parola *regolarità*, (che uso in mancanza di meglio) non esprime così bene il concetto come la tedesca *Gesetzmässigkeit*, la quale derivando da *Gesetz* = legge, dà subito l'idea di vere e proprie relazioni quantitative, esprimibili con formule algebriche, assai semplici se le righe vengono determinate per mezzo delle frequenze o numeri di oscillazioni.

Due sono i tipi di regolarità, i quali in molti casi combinano tra loro: le serie e le uguali differenze dei numeri di oscillazioni. Una serie è una successione regolare e illimitata di righe, le quali

progredendo per frequenze crescenti vanno, con intensità decrescenti, avvicinandosi a un certo limite che non è raggiunto. L'analogia colla successione delle note armoniche è manifesta, salvochè per questa il limite dei numeri di oscillazione è infinito, mentre per le serie spettrali, il limite è finito, e la legge con cui le frequenze o numeri di oscillazione si seguono, è meno semplice. Spesso esse si aggruppano a due o a tre per volta, con una corrispondenza di elemento ad elemento, e formano così una serie di *doppie* o di *triple*. In oltre più serie di doppie o più serie di triple si riconnettono mediante certe semplici relazioni, a formare quelli spettri che ci offrono un più completo quadro di regolarità. Salvo qualche caso di righe che appariscono semplici, si può dire che gli elementi chimici a valenza dispari diano serie di doppie, mentre quelli a valenza pari dànno quelle di triple. Negli spettri più ricchi di serie si riconosce allora:

La serie principale, così detta perchè le sue righe sono le più visibili. Si conoscono solo le serie principali di un numero assai limitato di elementi, e sono quasi tutte serie di doppie, e queste vanno stringendosi in modo che si ha un limite unico.

Le serie prima e seconda accessorie. Sono quasi tutte di doppie o di triple, e le differenze tra i numeri di oscillazione dei varii elementi di tutte le doppie o triple delle due serie sono costanti, di modo che si ha due doppie o due triple limiti. Se si tratta di doppie e avvi la *principale*, il primo termine di questa presenta la stessa differenza che le doppie delle accessorie.

I numeri di oscillazione di ciascuna serie si possono esprimere più o meno esattamente, ma sempre assai bene, con formule molto semplici in termini del numero d'ordine; che se poi ci si contenta di una approssimazione non molto rigorosa, è possibile, per effetto delle relazioni che riconnettono le diverse serie di ciascuno spettro e anche dei varii spettri, determinare un grande numero di righe, appartenenti anche a elementi diversi, con un numero assai limitato di costanti.

Ciò è molto in sè, ma è ancora poco rispetto al desiderabile; perchè rimane un enorme numero di righe, il quale, sebbene vi si possa mettere qua e là un certo ordine col riconoscere qualche differenza costante di frequenza, più volte ripetuta, assomiglia tuttavia

piuttosto a un enorme e informe cumulo di materiale bruto, che a un edifizio.

Se da un lato la fede quasi religiosa che l'ordine debba in ultima analisi regnare e scoprirsi alla fine, anche dove appare il più gran disordine, è la principale forza che guida la scienza nei suoi passi, è pur sempre vero d'altra parte che nella scienza niente si può affermare per fede, e quando non potendo più dire « sappiamo » ci sentiamo voglia di dire « crediamo », bisogna (come faccio io ora su questo punto) fare una cosa semplicissima: tacere.

§ 5. — *Origine della emissione luminosa.* — Sebbene sia da gran tempo noto che oltre la luminosità prodotta dal riscaldamento, ve ne sono pure altre, prodotte da cause assai varie, che si raccolgono sotto il nome generico « *luminescenza* », pure, siccome i mezzi usati per produr le righe sono per lo più, e possono parere sempre, anche mezzi di energico riscaldamento, così in passato si è considerata questa emissione quale un semplice effetto dell'alta temperatura, una *pura radiaziome di temperatura*, un'*incandescenza.*

Orbene la pura radiazione di temperatura ha le sue leggi fondate sui principii della termodinamica; e spetta a Kirchhoff la gloria di avere per tal via, tra il potere emissivo E, e il potere assorbente A di una qualunque sostanza, ed una quantità ε dipendente dalla sola temperatura, cioè il potere emissivo del *corpo nero*, dimostrata la relazione:

$$E = A\,\varepsilon$$

la quale spiega perfettamente, come voi sapete, l'inversione dello spettro, ed è stata per molto tempo, e in un certo senso è ancora, la chiave della analisi spettrale.

Tutto ciò è così armonico e discende con tanto rigore dalle premesse, che, essendo queste confacevoli al buon senso, pareva ormai fosse stata detta sull'argomento l'ultima parola.

Ma poi la premessa minore, che cioè le radiazioni dei gas fossero puramente di temperatura, perse credito, specialmente per l'opera del Pringsheim, il quale anzi sostenne validamente, se non dimostrò irrefutabilmente, l'emissione delle righe essere sempre una luminescenza. Per alcuni casi io mi dichiaro persuaso, altri però sono

assai discutibili, e furono molto discussi in passato. Ma poi la questione, anzichè venire risoluta nella forma in cui era stata posta dapprima, andava spostandosi, e mutando importanza, e significato.

Per propugnare la luminescenza il Pringsheim prende le mosse dal fatto che invano col semplice riscaldamento si cerca di ottenere le righe dai gas come l'idrogeno, che le producono facilmente per effetto delle scariche elettriche.

Ma invece di sforzarci per indurre se un più energico riscaldamento, che non sappiamo ottenere, produrrebbe l'effetto stesso delle scariche, o se invece queste abbiano una azione peculiare cui nessuna temperatura sia equivalente; noi ci proporremo la questione, se il primo mezzo, quale realmente si effettua, è incapace di somministrare l'energia sufficiente ai vibratori già esistenti in seno al gas, o se invece questi si producono solo col secondo modo di eccitazione.

A questa domanda, che ha un valore più positivo, non potrebbe rispondere l'esperienza di emissione. Perchè essa si traduce nel fatto a chiedersi, se la eccitazione operi sul potere assorbente, e il non vedersi le righe anche a temperatura elevata, potrebbe dipendere dall'essere A così piccolo che E riuscisse inapprezzabile, finchè valesse la legge di Kirchhoff detta or ora.

Ma una risposta chiara ci dà questa esperienza di inversione dovuta ai due fisici inglesi Liveing e Dewar, la quale è invero assai vecchia, ma il cui giusto valore si apprezza ora soltanto. L'idrogeno percorso dalle scariche elettriche di una bottiglia di Leida dà adunque una serie di righe di cui la più intensa è quella rossa sulla quale è puntato questo spettroscopio.

Se le scariche sono assai intense e il lume del tubo è stretto, queste righe non solo si rinforzano, ma si espandono sfumandosi da ambe le parti, come farebbe la gialla di or ora se caricassi vie più la fiamma di sodio, e ciò è già un indizio che colla densità della corrente di scarica cresca la densità dei vibratori, ma non una prova chiara. Orbene qui le cose son disposte in modo che, come vedete, la luce emessa dall'idrogeno nella parte capillare di questo tubo di Plücker, per giungere allo spettroscopio, sulla cui fenditura è concentrata da questa lente, traversa l'idrogeno contenuto nella parte più larga (fig. 40). Ciascuno di voi può alla sua volta vedere la riga rossa espansa solcata da una sottile riga oscura, o come si dice

autoinvertita. L'inversione è prodotta dall'idrogeno del tubo largo, perchè esso è percorso dalle scariche che lo rendono capace di emettere appunto la stessa riga, senza di che l'idrogeno non darebbe, neanche con grandi densità e spessore, nessuna riga scura sullo spettro continuo della luce che lo traversasse. Ciò mostra le scariche esser causa non solo dell'emissione ma anche dell'assorbimento, non solo somministrare l'energia necessaria alle vibrazioni luminose, ma anche costruire i sistemi capaci di compierle. E riferendomi alla rappresentazione analitica di or ora dirò, che l'eccitazione non solo fissa l'integrale particolare, ma anche il sistema stesso delle equazioni differenziali.

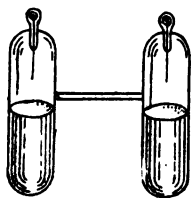



Fig. 40

Ma il più interessante si è, che l'esperienza può ripetersi anche con un gas monoatomico come l'elio; cosicchè non vale una spiegazione chimica, come sarebbe una scissione di molecole in atomi liberi, ma siamo costretti ad ammettere che gli atomi stessi si alterino per dar luogo ai vibratori. Una tale affermazione vi sarebbe, o signori, parsa audace e quasi direi eretica solo dieci anni fa. Ormai però i fenomeni della radioattività, vi avranno abituati a non considerare più gli atomi come quel qualcosa di inalterabile e immutabile, che significherebbe la parola, e che i professori di chimica hanno forse troppo insistentemente proclamato.

§ 6. — *Gli ioni positivi.* — Dunque non l'atomo, ma una sua modificazione costituisce il vibratore di cui dianzi vi parlavo come di un ente ipotetico, atto a spiegare la triplice manifestazione della riga. Orbene lo studio di molti fenomeni specialmente elettrici, ha indipendentemente da ciò che ho detto finora, condotto i fisici ad ammettere l'esistenza di atomi modificati così da presentare una carica positiva, detti atomi-ioni positivi.

Questa stessa ipotesi fa senz'altro al caso nostro (ed è un bel passo della scienza, tutte le volte che una stessa ipotesi si riconosce base idonea a due teorie): molti fatti invero giustificano pienamente la tesi propugnata da J. Stark, che i vibratori delle righe sieno appunto gli atomi-ioni positivi; tali sono: la tendenza generale della luminosità di esse righe a portarsi verso i punti di più basso

potenziale elettrico, la quale si verifica in modi e casi assai svariati; la variazione parallela della conducibilità elettrica e della dispersione anomala nel vapore di sodio; la facilità con cui le righe si ottengono da composti che si dissociano nei loro elementi, ecc... Ma sopra tutte persuasiva, e interessante anche per altri rispetti è questa bella esperienza dello Stark, che ciascuno di voi può osservare qui ripetuta; la quale mostra collo spostamento delle righe nello spettro, come gli atomi-ioni, sospinti dal campo elettrico, acquistano una velocità di molte centinaia di chilometri per minuto secondo.

Vedete questo tubo di Crookes (fig. 41) in cui l'anodo è della solita forma, e al solito posto a un estremo, mentre il catodo è collocato verso il mezzo occupando tutta la sezione interna, ed è perforato da molti canaletti? Esso è pieno di idrogeno ad una pressione estremamente piccola; quando vi passano le scariche di questo rocchetto di Ruhmkorff, dalla parte del catodo che guarda l'anodo partono i *raggi*

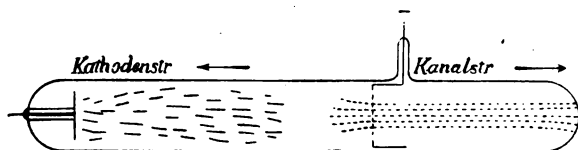



Fig. 41.

catodici, che sono costituiti da *corpuscoli* o *elettroni* negativi, mentre gli ioni positivi ossia gli atomi ioni dell'idrogeno giungendo al catodo animati di una gran velocità, ne traversano i canaletti e proseguono per inerzia dietro di esso, formando un fascio di raggi detti dal Goldstein che li scoperse *Kanalstrahlen*, espressione che mal si traduce in italiano con *raggi canali*. In essi il rapporto tra massa e carica è lo stesso che si ha per l'idrogeno nell'elettrolisi: dunque si tratta di quelli stessi ioni che conducono l'elettricità nelle soluzioni acquose degli acidi. Invece il rapporto corrispondente è per i raggi catodici 1800 volte più piccolo; e si ammette che i *corpuscoli* o *elettroni* siano una piccolissima parte dell'atomo dell'idrogeno che è il più piccolo. Ciò era, sicuramente, a voi già noto ed io l'ho ripetuto, solo per fissare bene come stanno le cose nella particolare disposizione che avete sott'occhio. Ora non bisogna credere che tutti li ioni positivi, i quali costituiscono i raggi canali, abbiano proprio la stessa velocità; ve ne saranno dei più o dei meno

veloci, e saranno ancora presenti nel tubo degli atomi ioni quasi fermi. Ma se questi ioni positivi sono, come abbiamo detto, i vibratori, i movimenti loro potranno esser rivelati per l'effetto di Doppler da spostamenti delle righe nello spettro. E infatti lo Stark, il quale per primo esaminò la luminosità di questi raggi collo spettroscopio, osservò (come ora qui ognuno di voi) accanto a ciascuna delle solite righe prodotte dai vibratori quasi fermi, una riga sfumata, e spostata rispetto ad esse diversamente a seconda della orientazione relativa del tubo e dello spettroscopio. E precisamente lo spostamento, massimo se la direzione di osservazione coincide con quella dei raggi, nullo se le è parallela, avviene verso il violetto quando i raggi si avvicinano all'osservatore, verso il rosso quando se ne allontanano.

Non voglio con voi, signori, discutere a fondo questa esperienza e la teoria particolareggiata che ne ha fatto lo Stark stesso, nè l'altra per me più persuasiva svolta dallo Schott, per indagare l'origine della emissione dei vibratori in moto e di quelli fermi, e la relazione tra velocità e intensità dell'emissione; nè insistere su la chiarezza della prova che essa reca a quanto vi sono andato dicendo dei vibratori; ma voglio fare una breve diversione per mettere in confronto questi spostamenti di righe, con quelli non maggiori che si osservano spesso in alcuni fenomeni solari. Gli astronomi, abituati come sono a non spaventarsi dei grandi numeri (uso una arguta espressione di Henry Poincaré), non avevano esitato a interpretarli come indizi sicuri di masse moventisi con grandi velocità, che raggiungevano perfino più centinaia di chilometri al secondo; ma a qualche fisico queste enormi velocità (vere e proprie velocità di materia in moto) parevano inverosimili, e tale inverosimiglianza francamente sospingeva anche me, verso le teorie dell'Julius, che dianzi ho ricordato, secondo le quali la dispersione anomala sarebbe il principale agente dei fenomeni spettroscopici solari. Ora ecco che velocità anche maggiori si producono e si manifestano collo stesso mezzo dell'effetto di Doppler, quì *in vitro* (come direbbero i chimici biologi, in un caso non molto diverso), e ciò con mezzi elettrici piuttosto modesti. Basterà dunque ammettere che nei così detti temporali del sole, possano operare campi elettrici forse non più intensi di quelli che operano in un temporale della nostra atmosfera, per

rendersi perfettamente ragione, di come i vibratori (ossia gli atomi ioni) possano assumere velocità sì grandi. Niente adunque di inverosimile.

Ed ora un'avvertenza per togliere una difficoltà, la quale (io mi penso) sorge nella vostra mente; chè, se non la risolvessi, voi forse sospettereste, due diverse teorie fisiche fondarsi sopra ipotesi non solo diverse e indipendenti (il che può esser benissimo, essendo per ora solo un pio desiderio l'unificazione di tutta la nostra scienza), ma anche inconciliabili tra di loro (il che porterebbe necessariamente a dovere scegliere tra le due teorie).

Il prof. Garbasso, nel trattarvi del fenomeno di Zeeman, partì (seguendo il Lorentz) dalla ipotesi che l'emissione luminosa fosse originata dalle vibrazioni di cariche negative. Io vi ho data per buona l'ipotesi che i vibratori sieno ioni positivi. Non vi è contraddizione? domanderete. « Non vi è affatto contraddizione » rispondo: Altra cosa sono le cariche che entro il vibratore hanno capacità di oscillare, che cioè lo fanno esser tale; altra cosa è la carica complessiva di tutto il sistema. E se vogliamo farci un'immagine dell'atomo secondo le teorie di J. J. Thomson, lo penseremo costituito da una carica positiva diffusa in un volume relativamente grande, e da molti (circa 1800 per l'idrogeno) corpuscoli negativi che sono da essa mantenuti in una figura di equilibrio assai complicata. Finchè la carica positiva uguaglia perfettamente la somma delle negative, il sistema è per l'esterno elettricamente neutro. Ma se esso perde uno, due o più corpuscoli, ecco si forma un atomo ione la cui massa è quasi identica a quella dell'atomo, ma risulta dotato di una, due o più cariche elementari positive.

Ma questa immagine dell'atomo, atta a riconnettere molti ordini di fatti fisici e chimici, a noi oltre che per ristabilire l'accordo tra le due ipotesi le quali a prima giunta parevano inconciliabili, serve per renderci ragione di un altro ordine di fatti, che costituiscono forse il più valido ausilio della analisi spettrale moderna, e si raccolgono sotto la denominazione di *molteplicità spettrale.*

§ 7. — *La molteplicità spettrale.* — Ogni elemento chimico è individuato (come voi ben sapete) dal suo spettro ossia dall'insieme delle sue righe; ma non bisogna credere che esse si presentino

sempre tutte simultaneamente, e nemmeno che, migliorando la sensibilità dell'esperienza, compaiano progressivamente a cominciare dalle più forti sempre colla stessa successione.

Invece ogni spettro è formato da più schiere di righe, che paiono connesse tra loro da una certa necessità di concomitanza; a seconda delle condizioni di produzione, prevale or questa or quella di tali schiere, su le altre che sono meno visibili o anche mancano affatto.

Cosicchè si potrebbe anche dire che ogni elemento presenta varii spettri corrispondenti a varii modi e condizioni di produzione.

Ciò, se da un lato è una complicanza, da un altro costituisce un prezioso aiuto, sia per lo studio delle regolarità, sia per l'analisi spettrale. Appunto tra le righe concomitanti si ritrovano gli elementi di una stessa doppia, di una stessa tripla, di una stessa serie e vi sono altre relazioni, che fra poco accennerò, tra molteplicità e regolarità, le quali confermano il valore obiettivo della classificazione fatta per mezzo di queste, e dànno un filo di Arianna, col quale si può sperare di rinvenirsi nell'intricato labirinto di spettri come quello del ferro, ricercandovi le famiglie di righe da provare per una qualche semplice relazione numerica.

La conoscenza del modo come si muta lo spettro colle condizioni di produzione, ha portata l'analisi spettrale assai oltre il riconoscimento di questo o quell'elemento chimico. Essa ormai si concepisce come l'insieme delle indagini sulla costituzione e sullo stadio della materia, che si imprendono valendosi della emissione, dell'assorbimento, della dispersione anomala; e si cerca con essa di trascendere la chimica, non altrimenti che collo studio delle scariche nei gas (il quale in parte vi rientra), e della radioattività.

Le fiamme, gli archi elettrici, le scintille, le scariche nei gas rarefatti sono i comuni mezzi di produzione degli spettri, i quali riescono diversi non solo dall'uno all'altro mezzo, ossia per diverse sorgenti, ma anche per le diverse parti di ciascuna sorgente, e per le diverse fasi quando si tratti di fenomeni periodici, come l'arco alternato e le scariche oscillanti.

Quando non si dubitava che l'emissione non fosse dovuta alla temperatura, e questi mezzi si consideravano come mezzi di riscaldamento, non v'era che da ascrivere le differenze ai diversi gradi di temperatura. E veramente il grosso dei fatti si prestano bene a

essere interpretati in questo modo, ciò che rende fino a un certo punto sostenibile l'origine di incandescenza.

Ma similmente a ciò che ho fatto or ora in occasione del gas che presentava o no le righe, non mi voglio indugiare neanche ora sulla quistione della luminescenza o incandescenza, e invece preferisco porre l'altra domanda, che parmi abbia un valore più positivo: in che cosa consiste la differenza tra le varie condizioni della materia che dà i varii spettri?

Due vecchie ipotesi si sono contese il campo, quella che fu detta anche della *campana*, e quella della *dissociazione*.

Secondo la prima, i sistemi vibranti corrispondenti alle righe di un elemento sono sempre presenti tutti: la *costituzione* della materia è sempre la stessa, solo i varii agenti eccitano or queste or quelle delle vibrazioni possibili. Si ha (per fare un'analogia acustica) sempre lo stesso istrumento, ma cambia la nota o l'accordo che su di esso si tocca.

Secondo l'altra ipotesi propugnata fino all'esagerazione, ma con geniale e ardito intuito libero da pregiudizii accademici sulla inalterabilità dell'atomo, dal grande spettroscopista Norman Lockyer, in tutta la sua opera indefessa; secondo l'altra ipotesi dico, l'atomo si scinde in varii modi nelle varie condizioni, dando via via nuovi sistemi vibranti; non cambia solo la musica ma anche l' istrumento. Ma in questi termini quasi direi popolari, mal si apprezzerebbe il vero valore scientifico delle due ipotesi. Il prof. Antonio Garbasso ben seppe formularle in termini analitici secondo lo spirito della nostra scienza severamente intesa, di connettere in modo sicuro i fatti con concetti matematici, non con espressioni popolari nè accademiche o scolastiche.

Ricordate che in principio vi ho parlato di sistemi di equazioni differenziali rappresentanti la costituzione del corpo, e di integrali particolari rappresentanti i singoli fenomeni che vi possono avvenire? Orbene, nel dir ciò avevo in mira appunto questa interpretazione analitica delle due ipotesi.

Secondo la prima adunque il sistema di equazioni differenziali rappresentante un certo corpo semplice, sarebbe sempre lo stesso, e varierebbe la scelta degli integrali particolari. Secondo l'altra muterebbero le stesse equazioni differenziali.

È manifesto allora che la prima e perienza non può dare una risposta decisiva alla quistione, perchè osserviamo con essa un integrale particolare del sistema, e non possiamo nè escludere nè affermare la possibilità di altri.

La può dare la seconda cioè quella dell'inversione, perchè con essa si saggia la possibilità di un integrale particolare corrispondente a un certo periodo, anzi simultaneamente la possibilità di tutti quelli compresi in un certo intervallo. Ma siccome l'emissione si intralcia sempre colla inversione, così queste esperienze non risultano altrettanto chiare come la terza, quella della singolarità di dispersione.

Ecco quattro fotografie eseguite da me su di un arco a corrente alternata con stronzio, e altre quattro con calcio. Le immagini di ciascuna quaderna corrispondono alternativamente alla fase di intensità zero e a quella di intensità massima. Ciò è ottenuto intercettando la luce con un disco convenientemente traforato che gira solidalmente con l'asse dell'alternatore, ma può con un rapido scambio prendere su di esso l'una o l'altra delle posizioni corrispondenti alle fasi da confrontare. Orbene osservate attentamente: mentre per queste righe (lunghezze d'onda 421,5; 407,8 dello stronzio, 396,8 396,4 del calcio) l'incurvamento delle frangie, è maggiore nella fase di massimo che in quella di zero; l'opposto avviene per quest'altre (460,7 dello stronzio, 422,7 del calcio). Ciò non può lasciarvi in dubbio sulla interpretazione. I vibratori delle prime righe si formano in maggior numero col crescere della corrente, mentre quelli delle altre si disfanno in buona parte.

Sono adunque diverse le equazioni differenziali rappresentanti i due stadii, poichè l'esperienza si traduce in espressioni analitiche, col saggiare la possibilità di certi integrali particolari, e dà due risultati diversi nei due casi.

Spero, o signori, che queste fotografie meglio e più speditamente di una lunga discussione sulle esperienze di inversione di Liveing e Dewar, e su le osservazioni di spettroscopia celeste del Lockyer, vi abbiano persuaso che un elemento può dare più di una specie di vibratori, che cioè la interpretazione degli spettri multipli propugnata dal Lockyer stesso contenga più di verità dell'altra, a condizione si intende di sfrondarla da alcune esagerazioni che hanno resa difficile la sua accettazione.

A questo scienziato adunque l'onore di avere forse per il primo operato validamente a correggere il concetto accademico dell'atomo inalterabile.

Egli in parte precorse così i concetti moderni sulla costituzione della materia. E questi, nati più che altro dallo studio della radioattività e dell'elettricità nei gas, ricevono un appoggio nei fatti già da tempo registrati e ordinati dallo spettroscopista.

Invero il modello proposto dal Thomson per la struttura dell'atomo, del quale or ora vi facevo cenno, si presta benissimo a spiegare la formazione di vibratori in varie specie, con la perdita di elettroni diversamente disposti nell'edificio, o di elettroni in diverso numero, e ciò sotto l'azione di perturbazioni più o meno energiche a seconda della varia loro stabilità; perturbazioni che rappresentano i diversi gradi di eccitazione. E questo modello non sarebbe nemmeno incompatibile con vere e proprie scissioni di atomi più pesanti in atomi più leggeri (come sarebbe a dire atomi di ferro o calcio in atomi di idrogeno o elio ecc.) quali il Lockyer pensa avvengano in certe stelle, ove il grado di eccitazione trascende quello ottenibile nei nostri laboratorii.

Ma anche prescindendo dalle conseguenze filosofiche sulla struttura della materia, questo modo di concepire la molteplicità, è il solo fecondo di applicazioni alla analisi spettrale. Secondo esso i tre modi di sperimentare in quanto attestano la presenza di una certa schiera di righe cioè di un certo stadio di un elemento, si equivalgono in sostanza, ed è pienamente giustificato il processo principale della spettroscopia celeste, che è un confronto tra le righe di emissione ottenute in laboratorio e le righe invertite del sole e delle altre stelle.

Ecco che lo spettroscopio ci permette (come ha dimostrato col fatto N. Lockyer, anche per chi non accetti tutte le sue premesse e le sue conclusioni) non solo di attestare la presenza di questo o quell'elemento chimico in questa o quella stella; ma di sorprendervi il suo modo di essere, di stabilire la fase di evoluzione, il momento di vita che palpita, durante il nostro brevissimo attimo di vita umana, nelle varie parti del tutto.

Ma per far ciò un lungo studio di laboratorio deve preventivamente ordinare gli elementi della molteplicità. Si tratta cioè di far

variare largamente le condizioni fisiche di produzione, e di registrare i corrispondenti spettri. Orbene, nel fare questa sistemazione v'era da temere una complicanza enorme e invece, fortunatamente, si trova una semplicità confortante. Tanti sono gli elementi sperimentali che si possono variare, nell'eccitare i fenomeni luminosi, che, se la variazione prodotta da ciascuno fosse di specie intrinsecamente diversa da quella prodotta dagli altri, vi sarebbe poca speranza di ricavare dal gran lavoro, alcuna conclusione abbastanza chiara e semplice da essere applicabile all'analisi spettrale. Invece le variazioni prodotte con modi svariati, spesso sono le stesse; l'effetto è assai meno complicato della causa, e in conclusione per la massima parte gli spettri si possono disporre sopra una semplice scala, e tutto si riduce a passare da un gradino al successivo e così via. In matematica si direbbe che tutto dipende da un unico parametro. Ciò pareva ovvio quando si riteneva che i mezzi di produrre gli spettri di righe non fossero in sostanza che mezzi di riscaldamento più o meno energici: la temperatura era il parametro. Ora bisognerà o dare a questa parola « temperatura » un senso più generico e meno determinato, o, come io preferisco per non ingenerare equivoco, adottare una espressione più generica dicendo che il parametro è il grado di eccitazione. Esso cresce colla concentrazione della energia impiegata per produrre la luminosità: è *basso* nelle fiamme degli ordinarii bruciatori, sale di un gradino, passando a quelle alimentate da ossigeno puro, di un altro gradino passando all'arco elettrico, di un altro passando alle scintille più violente. Ma le scintille a seconda degli elementi elettrici hanno gradi di eccitazione variabilissimi: quelle delle scariche oscillanti, con grande autoinduzione, nelle quali l'energia potenziale del condensatore si dissipa gradatamente in un numero assai grande di oscillazioni, possiedono un grado di eccitazione assai basso il quale si eleva di mano in mano che si diminuisce l'elica, fino a raggiungere quello altissimo delle scintille di un condensatore con un arco di scarica semplice e breve.

Ma anche in una stessa sorgente le parti corticali hanno grado di eccitazione inferiore a quello delle interiori; e se si proietta l'immagine della sorgente sulla fenditura, si osservano, come sapete, le righe *lunghe* e *corte*, delle quali adunque il grado di eccitazione

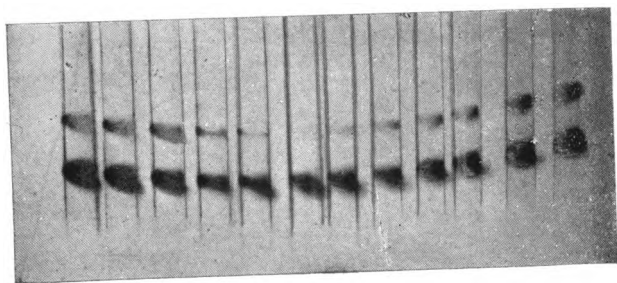



Fig. 1

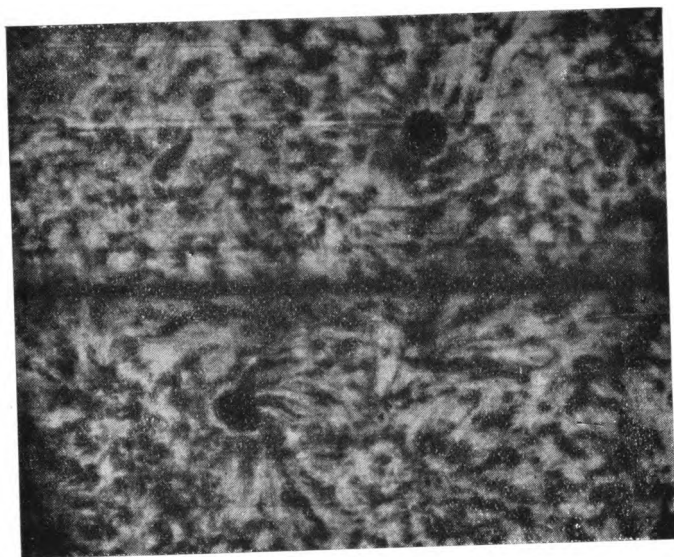



Fig. 2.

Fig. 3.

varierà inversamente alla lunghezza. Della relazione colla regolarità mi basta qui accennare, che le serie principali corrispondono a un grado di eccitazione piuttosto basso, le accessorie prima e seconda a gradi un poco superiori, ma fra le righe dei più alti gradi ottenuti, per ora si sono riconosciute scarse regolarità.

Questo lo schema secondo il quale si ordinano gli spettri multipli in laboratorio. Comparandoli poi a quelli degli astri, si ritrovano i più bassi gradi nelle righe invertite delle stelle *rosse*, poi vengono le righe invertite delle *gialle*, compresevi quelle del sole cioè lo spettro di Fraunhofer, che corrispondono presso a poco al grado dell'arco, segue lo spettro delle righe chiare cromosferiche, e le righe invertite delle stelle *bianche* le quali formano una scala estendentesi assai oltre il più alto gradino raggiunto (dirò così) *in vitro*.

§ 8. — *La spettroscopia celeste.* — Signori, da ciò che ho detto voi dunque concepite la spettroscopia celeste come un confronto assiduo tra esperienze fisiche e osservazioni astronomiche, eseguite col fine di fare induzioni sulla costituzione degli astri, fondandosi sulle cognizioni direttamente acquistate col cimentare la materia che ci è tra mano.

Ma questa relazione continua tra la fisica e l'astronomia non è meno feconda per l'una che per l'altra scienza. Anzi in questo particolare è chiaramente visibile come la funzione di *scienza madre*, che compete alla astronomia, non è cessata in tempi remoti, ma persevera anche adesso. È stato detto e ridetto che nei fenomeni del cielo primamente gli uomini scorsero il ritmo esatto, la armonia unificatrice del molteplice nel tutto, che in questa più divina pagina del *gran libro della natura* primamente *riconobbero i caratteri della lingua matematica*, *triangoli*, *cerchi ed altre figure geometriche*, che per tal via attinsero il concetto di *legge* naturale, e la parola νόμος dette appunto fino dalla antichità il nome alla scienza che fu madre delle scienze.

Ma la *legislatrice degli astri* è una madre amorosa che guida ancora i passi delle figlie, e ne riceve largo compenso di doni.

Questo non vi ho detto per fare una digressione storica dal mio argomento ma per illustrarlo meglio. Jannsen e Lockyer presso

che contemporaneamente osservarono le forme delle protuberanze solari allargando la fenditura dello spettroscopio combinato al cannocchiale, e assai tempo dopo il Lenard, non contento alla osservazione delle righe lunghe e corte, allargò la fenditura dello spettroscopio sulla quale era proiettata l'immagine dell'arco, e osservò le forme monocromatiche di questo. Ma si può anche proseguire l'imitazione dei procedimenti astronomici, e porre lontana la sorgente abolendo del tutto il collimatore, come ha fatto il nostro prof. Garbasso, e come ho preparato io in questa esperienza che tra poco vi mostrerò.

Le forme che così si osservano sono oggetto per me di viva curiosità, esse mutano del tutto da riga a riga, e in parecchi casi mostrano una cavità centrale che manifesta il disfarsi di quella tale specie di vibratori giungendo là ove il grado di eccitazione è per essi troppo elevato. Ma più di tutto colpisce il fatto che mentre righe di elementi diversi, cui compete lo stesso grado di eccitazione, dànno immagini somigliantissime, righe dello stesso elemento ma relative a gradi di eccitazione diversi dànno immagini assai dissimili per dimensioni e per forma. Interessante è poi seguire la storia di queste forme nelle varie fasi dell'arco alternativo. Una descrizione particolareggiata di tale istoria sarebbe impossibile, ma ciascuno di voi può qui seguire le vicissitudini delle immagini monocromatiche di un arco con sodio, coll'aiuto di questo metodo stroboscopico.

Sull'asse dell'alternatore è adattato un gran disco di cartone inciso da una stretta fenditura che segue una spirale di Archimede; lungo una retta passante per l'asse, scorre, girando questa vite, lo spettroscopio senza fenditura formato da un cannocchiale e da un prisma di Amici. Ad ogni posizione dello strumento corrisponde adunque una fase, anzi per la forma della incisione gli spostamenti di quello sono proporzionali alle variazioni di questa. Voi qui potete percorrere a vostro agio avanti e indietro lo spazio di mezzo periodo compreso tra due fasi di massimo, traversando una fase di zero della corrente. In linea collo strumento, a qualche metro di distanza, brilla l'arco tra carboni carichi di cloruro sodico.

Seguite, per esempio, il ciclo della immagine gialla, (cioè data dalla solita riga che è il primo termine della serie principale) e quello della vicina verde (che appartiene alla prima accessoria), e vedrete

come la prima non cambia molto di dimensioni, e persiste anche quando la corrente si annulla, mentre l'altra colla sua larghezza segue da vicino le variazioni della corrente, e si spegne nella fase di zero. Queste e parecchie altre particolarità, che potete osservare, vi dicono chiaramente essere tali immagini un indizio piuttosto fisico che chimico: esse non ci descrivono come è distribuito il sodio (che certo invade tutto l'arco), ma quei certi vibratori che da esso si ottengono, cioè quei certi gradi di eccitazione cui essi competono (Tav. II, fig. 1).

Per la riga gialla, infatti, non occorre giungere al vero e proprio arco, ma basta l'aureola di vapori caldi che lo contorna, o la colonna di quelli che permangono nel momento in cui la corrente si annulla. Per la riga verde e le altre della prima accessoria occorre un grado più elevato, quale si trova nelle regioni percorse dalla corrente: la sezione di queste immagini segue quindi più fedelmente le variazioni della intensità. Le righe della seconda accessoria richiedono, pare, un grado di eccitazione un poco più elevato; perchè danno immagini alquanto più strette; ma nella parte più interna dell'arco il grado deve esser troppo alto per la esistenza di tutti questi vibratori, perchè spesso le immagini ci appaiono come dissi, e ora potete vedere almeno in alcuna, cave e simili a calici.

Ma naturalmente non tutto ciò che concerne le figure monocromatiche che vedete è determinato da questo parametro, che illustra specialmente le differenze le quali tra esse si osservano: ma la maggiore luminosità presso il negativo è, per esempio, indizio della carica positiva che possiedono i vibratori e che ivi li addensa. E poi la eccitazione stessa dipende direttamente dalla distribuzione della energia elettrica che è la causa di ogni fenomeno, cosicchè queste esperienze non sono complete se non accoppiate a misure di quanti più si può elementi elettrici.

E in generale una illustrazione soddisfacente dal punto di vista energetico, fisico e chimico di tutti quei fenomeni svariati che costituiscono le sorgenti di luce, si può sperare solo da una simile unione di esperienze diverse e simultanee. E tanto più che ormai agli stessi enti (gli ioni positivi) sappiamo doversi attribuire, sia l'origine dei fenomeni luminosi, sia una parte importante di quelli elettrici, sia infine un valore speciale in quelli chimici.

Ma queste disposizioni senza fenditura, per quanto eleganti e assai convenienti ad un primo studio di orientamento, sono ancora imperfette, in quanto che non si prestano a dare immagini nette con righe espanse o con bande, nè a sceverare elementi vicini nello spettro. E secondo il solito a far meglio bisogna imparare dagli astronomi.

E come si possano ottenere eccellenti fotografie monocromatiche del sole lo ha insegnato Giorgio Hale col suo *spettroeliografo*. Mu-

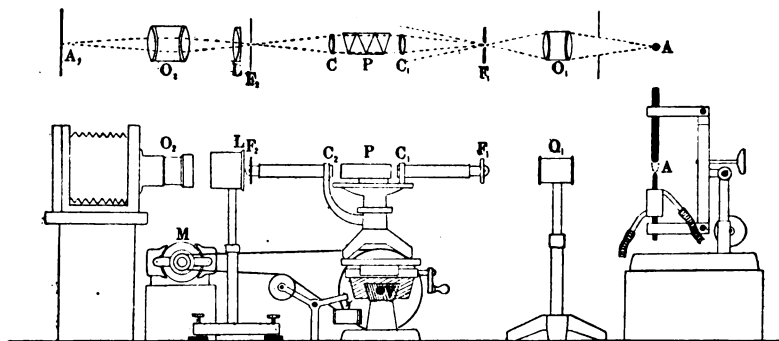



Fig. 42.

nito un potente spettroscopio di una seconda fenditura nel piano focale del secondo obiettivo (cioè nel piano ove si forma lo spettro puro), dalla quale passa la luce di una sola riga, egli fa scorrere l'immagine solare sulla prima fenditura, mentre sulla seconda scorre una lastra fotografica. La immagine così integrata dice come è distribuita sul sole la origine di quella luce.

Con una minuscola imitazione dello spettroeliografo (fig. 42) [1] io ho ottenuto queste immagini monocromatiche dell'arco elet-

---

[1] Le varie parti son fissate sopra un solido banco di legno: la sorgente che si vuol fotografare (che nelle esperienze era l'arco elettrico A) manda i raggi nell'obbiettivo O_1 di grande apertura, il quale ne proietta una imagine (un poco impicciolita) sulla fenditura F_1 dello spettroscopio a visone diretta, in cui all'oculare è sostituita una seconda fenditura F_2. Questo è nelle mie esperienze uno spettrometro costruito da Steinheil, munito di un prisma dell'Amici. Il cannocchiale di osservazione dello spettrometro può girare intorno all'asse insieme col cerchio graduato, o spostarsi relativamente a questo.

Prima di togliere filo e oculare, si riferiscono le indicazioni del circolo alle lunghezze d'onda coll'aiuto dello spettro solare e di spettri di emissione noti; poi, lasciato il cannocchiale sopra una riga forte e facilmente visibile (per esempio la doppia gialla del sodio) si pone al luogo del filo

trico, che riproducono fedelmente le configurazioni in cui sono distribuiti i vibratori delle serie del sodio (fig. 43), e mostrano ancora l'innestarsi delle configurazioni stesse su i carboni, ciò che non potete osservare coll'altra disposizione senza fenditura. E io spero appunto che questa ultima imitazione fisica di un metodo

Fig. 43.

astronomico, sia per fruttare qualche utile cognizione sull'arco e anche in avvenire sulle fiamme e sui gas rarefatti percorsi dalla corrente.

---

la seconda fenditura, e con un leggero spostamento del cannocchiale rispetto al cerchio; si fa in modo che essa comprenda la riga, lasciandone passare la radiazione. Così la graduazione, fatta agevolmente col filo, vale per la disposizione con due fenditure. Queste sono unilaterali, ma avendo il pezzo mobile da parti opposte, si possono senza alterare la graduazione allargare e restringere purchè in ugual misura.

E' bene però prima di operare sopra una riga, porre dietro la seconda fenditura un oculare positivo, e osservare, e, occorrendo, correggere il tutto in modo che la riga sia bene centrata nella fenditura.

Immediatamente dietro alla seconda fenditura si trova una lente acromatica L con distanza focale opportuna perchè l'immagine della apertura dello spettrometro si formi nell'obiettivo O_2 della camera fotografica, la quale è messa in punto sulla seconda fenditura. Lo spettrometro F_1 F_2 è montato sopra una poderosa slitta, tolta ad un tornio, che è mossa perpendicolarmente all'asse del collimatore della vite V sul cui albero è adattata una grande puleggia, che serve alla trasmissione del moto. Questo è prodotto da un motorino elettrico M. La trasmissione è fatta con una buona cinghiettina di cuoio tonda, trafilata, che una piccola puleggia spinta da un contrappeso, mantiene tesa sempre egualmente. L'uniformità di andamento della slitta, è, come si capisce, indispensabile per aver buone prove; di qui le cure prese che si mostrarono sufficienti, ma non superflue.

Riassumendo: la fenditura F_1 è nel piano coniugato di A rispetto al primo obiettivo O_1; F_2 nel piano coniugato di F_1 rispetto alle due lenti C_1 C_2; con questo però che soltanto le radiazioni corrispondenti a una certa posizione spettrale hanno libero il passaggio. O_2 e P si trovano pure approssimativamente in due piani coniugati rispetto al sistema C_2 L, e infine A_1 è in un piano coniugato di F_2 rispetto al sistema L O_2. Dunque, quando la parte F_1 C_1 P C_2 F_2 scorre perpendicolarmente all'asse ottico, F_1 percorre l'immagine di A; in F_2 questi elementi lineari dell'immagine sono riprodotti con luce monocromatica, e sono pure riprodotti in A_1 successivamente uno accanto all'altro, in modo da integrare sulla lastra la *fotografia monocromatica* desiderata.

Ma per la gentilezza del signor Hale stesso io posso chiudere questa mia conferenza mostrandovi qualcosa di bello davvero, che (lo confesso) ad arte ho serbato in fine per non far troppo arrossire o impallidire le mie rozze esperienze e le mie povere fotografie.

È una serie di immagini fotografiche ottenute nel *Solar Observatory of the Carnegie Institution of Washington, at Mount Wilson. California* dall'Hale fondato e diretto, la quale illustra i più recenti progressi della fisica solare.

Vedete prima delle altre questa fotografia ordinaria di una frazione del disco solare nella quale riconoscerete alcune *macchie* e *pori* e la granulazione della fotosfera. E ora passiamo a questa ottenuta per mezzo dello spettroeliografo, con la luce di una riga del calcio; essa rappresenta la stessa regione nella stessa epoca, ma la offre ai vostri occhi sotto un aspetto ben diverso. Tutta l'immagine è invasa da chiazze oscure e chiare a seconda che in questo o quel luogo predomini l'assorbimento o l'emissione, che son dette *flocculi* chiari e oscuri.

Abbiamo in essi manifestamente un documento delle condizioni fisiche in cui si trova nel sole il vapore di calcio e un elemento per la interpretazione dei fenomeni cui esso prende parte.

Ben diversa è la struttura di quest'altra fotografia ottenuta con una riga di idrogeno, essendo in essa i flocculi filamentosi e minuti.

Questi filamenti in vicinanza delle macchie, si dispongono in modo da dare assai evidente l'aspetto di un vortice, e precisamente due macchie collocate da parti opposte dell'equatore solare si mostrano, in quest'altra fotografia, animate da girazioni in senso opposto come i cicloni o gli anticicloni dell'atmofera terrestre. E la natura vorticosa delle macchie, intuita già in passato da Faye. pare si inquadri bene nel sistema delle idee recenti sulla struttura del sole (Tav. II, fig. 2).

Se questi vortici sono specie di enormi anticicloni, c'è da aspettarsi che esercitino una specie di succhiamento nelle regioni superiori: di un tal fenomeno ha tutto l'aspetto, ciò che è rappresentato in questa serie di fotografie ove vedete un gran *flocculo* oscuro di idrogeno (ossia una gran plaga occupata dai vibratori poco vivamente eccitati di questo elemento) allungarsi e avvicinarsi gradatamente, e finire poi tutto nell'ombra di una macchia (Tav. II, fig. 3).

E in ciò si potrebbe vedere una conferma delle idee del Secchi che appunto riteneva nell'interno delle macchie aversi una precipitazione di gas più freddi precedentemente accumulatisi nelle vicinanze.

Ma se i fenomeni spettroscopici sono, come vi ho lungamente spiegato, prodotti da ioni positivi, nel sole vi hanno ad essere cariche positive e quindi anche negative libere, con prevalenza or delle une or delle altre in questo o in quel luogo. Le quali poi se son mosse in giro nei vortici dovranno necessariamente generare un campo magnetico lungo l'asse dei vortici stessi. L'esistenza del campo magnetico entro aeriformi che presentano righe spettrali può venir rivelata dal fenomeno di Zeeman, come voi ben sapete, cioè da una scomposizione di ciascuna riga in due elementi con polarizzazione circolare, destrogiro e levogiro o in tre con polarizzazione ellittica o rettilinea; e ciò a seconda della rispettiva direzione del campo e della linea di mira.

E l'Hale appunto ha messo fuori di dubbio tali scomposizioni e polarizzazioni munendo degli analizzatori di Fresnel i suoi potenti spettroscopii: e in queste fotografie potete osservare le doppie e le triple, e ancora gli effetti dell'analizzatore che a seconda della sua posizione sopprime or l'una or l'altra componente.

Fortunatamente questo fenomeno si presta a un numero grande di confronti e controprove, cosicchè la esistenza di intensi campi magnetici nelle macchie solari è ben messa in chiaro.

Anche da questo cenno fuggevole voi vedete come alcune osservazioni bene appropriate e con mezzi convenientemente rinnovati hanno detto sulle macchie solari di più che non la infinita ripetizione sopra un enorme numero di casi particolari delle solite osservazioni metodiche. Difficilmente un metodo dà in seguito molto più di ciò che ha dato da principio. Per la parte descrittiva la conoscenza delle macchie era già stata portata assai avanti da Galileo, e in una lezione elementare anche oggi poco vi sarebbe da aggiungere alla meravigliosa descrizione che quel grande ne ha lasciato tre secoli fa.

Dopo, questa conoscenza fece un altro grande passo quando dapprima si applicò al cannocchiale lo spettroscopio. E per farle fare un terzo gran passo, è stato necessario quel rinnovamento di procedimenti del quale non ho preteso che darvi un cenno.

Nè potrei senza farvi un'altra conferenza (per la quale meglio di me sarebbe adatto un cultore dell'astrofisica) esporvi i progressi che gli studii solari in genere compiono sotto il poderoso impulso della Istituzione Carnegie: progressi rapidi e, come anche da queste poche parole avrete compreso, per alcuni punti decisivi. E ciò avviene per una felice concomitanza di varie cause. Non si aveva idea di mezzi finanziari così notevoli; ma non si aveva neanche esempio di grandi mezzi usati con altrettanta chiarezza di programma e sicurezza e pienezza di azione. Per il buon esito di queste, come di tutte le imprese, è indispensabile una proporzione perfetta tra la potenza dei mezzi e la capacità direttiva. Il marinaro che guida abilmente una barca, non saprebbe comandare una grande nave; e così avviene che mentre tutti i ricercatori si lamentano della scarsezza dei mezzi, molti di loro si troverebbero poi terribilmente impacciati e delusi se ne ottenessero di così grandiosi quali un mecenate miliardario si è compiaciuto profondere, nel nuovo e già famoso osservatorio.

D'altra parte non in tutti i momenti dello svolgimento di un ramo della scienza, l'uso dei grandi mezzi può esser veramente utile e dare frutti ad essi proporzionati. Negli studii solari appunto i mezzi di Secchi, di Lockyer, di Jannsen erano stati sfruttati a meraviglia da una legione di scienziati: le cognizioni che essi potevano da soli dare, erano ben fissate; le quistioni che essi non avevano capacità di risolvere, eran bene poste: il nuovo potente sussidio è caduto dunque nel momento buono, e in buone mani. L'orientamento era stabilito, l'opera poteva esser rapida e decisiva. Ma la rapidità è stata meravigliosa anche tenendo conto della maturità dei tempi e della abbondanza dei milioni. Basta dire che cinque anni fa dove ora sorgono le varie e singolari costruzioni dell'osservatorio non vi era che una montagna deserta.

Ma badate bene, o signori, queste costruzioni non son banali ingrandimenti proporzionali dei soliti tipi e modelli, che avrebbero insieme colla potenza moltiplicate le imperfezioni e la difficoltà di manovra, e non sarebbero riusciti forse ad altro che ad una pomposa manifestazione di vanità nazionale o plutocratica. E nemmeno complicazioni e raffinamenti, e sia pure perfezionamenti, che avrebbero reso il lavoro più gradito e la produzione un poco più perfetta,

ma non avrebbero portato niente di veramente nuovo. Sono essi nuovi tipi semplici e spicci, capaci magari di futuri perfezionamenti ma che superano *ex se* di potenza gli antichi, e nei quali gli inconvenienti delle grandi dimensioni sono spesso felicemente prevenuti fino dal concepimento stesso. Per esempio, la disposizione a torre, che pare la più felice, coll'andamento verticale dei raggi previene l'inconveniente della alterazione delle immagini per l'aria calda; colla doppia parete previene gli scuotimenti del vento; con il collocamento dello spettroscopio nel pozzo, previene le variazioni di temperatura della parte più essenziale dello strumento, poichè l'Hale suol dire: il telescopio non è per me che un mezzo di proiettare l'immagine sulla fenditura dello spettroscopio.

E la produzione già abbondante, varia, affascinante, nuova, significativa, fiorisce quasi naturale conseguenza del ben concepito piano, della pienezza dei mezzi e della chiara visione del fine. In ciò anche noi così modestamente dotati abbiamo molto da imparare e da imitare. Non la ricchezza, si capisce (purtroppo); ma ciò che essa può sì aiutare a manifestarsi, non può produrre da sè sola.

Intanto alcuni procedimenti e metodi di osservazione se avevano bisogno di fondi dirò così Carnegiani per essere iniziati e provati, possono benissimo con spesa relativamente modesta venire riprodotti e continuati.

E già da tempo nel nostro osservatorio di Catania è stato messo in opera con felice successo lo spettroeliografo.

Ma anche al difuori o al disopra del genere particolare di lavoro ci sia di scuola la bellezza della azione, anzi la unità perfetta delle varie azioni che convergono nell'opera solerte e ardita. Per parte mia mi piace riassumere ciò che di non propriamente scientifico ho appreso dalla lettura delle pubblicazioni, e più dalla conversazione coll'illustre scienziato in questa regola: non dimenticarsi mai che il più breve cammino da un punto a un altro è la linea retta.

MAX ABRAHAM

LA DINAMICA DEGLI ELETTRONI

§ 1. — *Radiazione per onde e radiazione per convezione.* — La teoria del campo elettromagnetico considera ogni specie di *raggî* come un *flusso di energia elettromagnetica.*

Così per esempio i raggî luminosi e termici costituiscono dei flussi di energia che vanno dal corpo emettente al corpo assorbente; la trasmissione dell'energia dal sole alla terra si ottiene per mezzo di tali raggî.

Ora, secondo la teoria elettromagnetica della luce, si hanno nei raggî luminosi e termici delle oscillazioni del vettore elettrico e del vettore magnetico, appunto come nelle *onde di Hertz*, emesse dall'antenna marconiana.

Tutte queste radiazioni, analoghe ai *raggî di forza elettrica* di Hertz, che si possono riunire sotto il nome di *radiazioni per onde*, si propagano nello spazio vuoto con la velocità comune

$$c = 3.10^{10} \frac{cm}{sec} .$$

Esse differiscono soltanto fra loro per la lunghezza dell'onda.

Lo studio delle scariche elettriche nei tubi a gas rarefatto portò alla scoperta di una nuova specie di raggî, i quali, essendo emessi dal catodo, vengono appunto designati, con un termine proposto dal Goldstein, col nome di *raggî catodici.*

Alcune proprietà di questi raggî furono illustrate nelle conferenze dei professori Battelli e Garbasso.

I successi, che la teoria ondulatoria aveva riportato nell'ottica, suggerirono naturalmente l'ipotesi che anche nel caso dei raggî catodici si trattasse di una specie particolare di onde. E questo modo di vedere fu sostenuto in modo speciale dai fisici tedeschi, e fra gli altri anche da H. Hertz. All'incontro alcuni fisici inglesi, e fra gli

altri W. Crookes e A. Schuster, proposero per i raggî catodici una teoria, che li considera come costituiti da sciami di particelle dotate di massa, discrete e cariche di elettricità negativa, le quali sarebbero respinte dal catodo e lanciate lungo il tubo.

Quest'ultima teoria, che potremo chiamare la *teoria balistica*, si manifestò, come vedremo, meglio corrispondente ai fatti.

Noi abbiamo quì un processo completamente nuovo per il flusso dell'energia, che le particelle elettrizzate trasporterebbero con loro.

Si può indicare questa specie di radiazione come una *radiazione per convezione*, contrapponendola dunque alla radiazione per onde.

§ 2. — *Esperienze di W. Kaufmann.* — A. Schuster, ha dedotto dalla teoria balistica una conseguenza notevole.

Consideriamo una particella con la carica $-e$ (in unità elettrostatiche), la quale lascia il catodo (K) con la velocità v_0, e attraversa un campo elettrico.

Per il punto generico P sia Φ la differenza di potenziale rispetto al catodo; l'incremento subìto dall'energia cinetica della particella durante il tragitto da K a P deve essere uguale al lavoro che nel percorso stesso fu compiuto dalla forza elettrica.

E dunque

$$\frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2 = e \Phi.$$

Supponiamo adesso che la velocità iniziale v_0 sia piccola rispetto alla velocità finale v, potremo scrivere

$$v = \sqrt{\frac{2 e \Phi}{m}}, \tag{1}$$

e concludere dunque che *la velocità finale è proporzionale alla radice quadrata della tensione.*

Sarebbe difficile determinare sperimentalmente la velocità e ottenere quindi una verifica di questa formula. Ma noi possiamo mettere la velocità in relazione con la *deviazione magnetica* dei raggî catodici.

La teoria balistica spiega questa deviazione nel modo seguente [1].

---

[1] Si confronti, per maggiori sviluppi, la conferenza del prof. Garbasso.

Sia il campo magnetico perpendicolare alla trajettoria; la carica in movimento si può considerare come un elemento di corrente, con l'intensità

$$-\frac{e\,v}{c}$$

(in misura elettromagnetica); essa subisce dunque nel campo magnetico una forza

$$\frac{e\,v\,\mathrm{H}}{c}$$

normalmente alla sua velocità, e questa forza, secondo le regole della meccanica del punto, produce una curvatura (ρ) della trajettoria determinata dall'equazione

$$m\,v^2\,\rho = \frac{e\,v\,\mathrm{H}}{c},$$

dalla quale segue

$$\rho = \frac{e\,\mathrm{H}}{m\,c\,v}; \tag{2}$$

e però la curvatura è inversamente proporzionale alla velocità.

Se poi si tiene conto dell'equazione (1), si può anche concludere che *la curvatura deve essere inversamente proporzionale alla radice quadrata della tensione:*

$$\rho = \frac{\mathrm{H}}{c}\sqrt{\frac{e}{2\,m\,\Phi}}. \tag{3}$$

Queste sono le conseguenze, che Schuster dedusse dalla teoria balistica.

W. Kaufmann, nel 1897, verificò quest'ultima relazione.

Siccome nella (3) e/m è la sola quantità incognita, da tali misure si poteva anche ricavare la grandezza

$$\eta = \frac{e}{c\,m},$$

che si suole chiamare *carica specifica* (in misura elettromagnetica).

Il valore ottenuto fu

$$\eta = 1{,}865.10^7,$$

qualunque fosse il gas col quale il tubo era stato riempito, e il materiale degli elettrodi.

Ora per il jone idrogeno si ha d'altra parte

$$\eta_{\mathrm{H}} = 9660;$$

e viene quindi la proporzione

$$\frac{\eta}{\eta_H} = \frac{e}{e_H} \cdot \frac{m_H}{m} = 2.10^3 \text{ circa.}$$

Le particelle che si muovono nei raggî catodici appariscono così completamente diverse dagli atomi della materia. Esse costituiscono una nuova specie, che si suole indicare col nome di *elettrone*.

Si potrebbe interpretare la relazione testè trovata per il rapporto delle cariche specifiche ammettendo che le masse fossero uguali, e allora si avrebbe

$$e = 2000 \,.\, e_H \,.$$

Ma questa ipotesi è estremamente inverosimile; anzi, dalle esperienze che furono già descritte a suo tempo dal prof. Battelli, si può dedurre l'uguaglianza delle cariche [1].

E viene allora

$$m = \frac{m_H}{2000};$$

a parole *la massa dell'elettrone è all'incirca 2000 volte più piccola che la massa dell'atomo di idrogeno.*

Portando il valore di η nella (1) o nella (2) si può calcolare la velocità degli elettroni, che si muovono nei raggî catodici; per tensioni, quali si adoperano comunemente, si trovano dei valori che vanno fino alla metà della velocità della luce, valori i quali, almeno per l'ordine di grandezza, si accordano con quelli trovati sperimentalmente da Wiechert.

§ 3. — *Conseguenze numeriche del fenomeno di Zeeman.* — Quasi contemporaneamente a queste ricerche quantitative sui raggî catodici si verificò la scoperta di Zeeman su lo sdoppiamento magnetico delle righe spettrali. Come si è già visto in altra conferenza il fenomeno di Zeeman si può spiegare ammettendo che nella molecola luminosa esistano delle particelle elettrizzate in movimento; ma quello che importa specialmente per noi è di constatare che dalle misure fatte sul fenomeno di Zeeman risulta un valore della carica specifica, che coincide a un dipresso con quelli ottenuti per il caso dei raggî catodici.

È facile vedere come questo si possa ricavare dalle misure dirette.

---

(1) Si vedano i paragrafi 7 e 8 della conferenza Battelli.

Consideriamo il movimento in un piano normale alle linee di forza magnetica. Il campo essendo nullo, da principio, si avrà

$$\begin{cases} m \dfrac{d^2 x}{d t^2} = - m k^2 x, \\ m \dfrac{d^2 y}{d t^2} = - m k^2 y, \end{cases}$$

dove k è la frequenza delle vibrazioni.

Il campo magnetico produce una forza perturbatrice

$$- \frac{e v H}{c},$$

normale alla velocità, le cui componenti sono

$$- \frac{e H}{c} \cdot \frac{d y}{d t} \quad \text{e} \quad + \frac{e H}{c} \cdot \frac{d x}{d t}.$$

Aggiungendo queste forze, le equazioni del movimento diventano

$$\begin{cases} \dfrac{d^2 x}{dt^2} = - k^2 x - \eta H \dfrac{d y}{d t}, \\ \dfrac{d^2 y}{dt^2} = - k^2 y + \eta H \dfrac{d x}{d t}. \end{cases}$$

Dall'esperienza si ricava che nel piano normale alla forza magnetica si hanno due vibrazioni circolari, aventi periodi un po' diversi da quello che corrisponde al moto non perturbato.

Per calcolare questa variazione di frequenza si può provare a sostituire nelle equazioni le soluzioni

$$\begin{cases} x = a \sin \nu t, \\ y = \pm a \cos \nu t, \end{cases}$$

corrispondenti appunto a vibrazioni circolari.

Dalla sostituzione si ricava

$$- \nu^2 = - k^2 \pm \eta H \nu,$$

e dunque, come radici positive,

$$\nu = \mp \frac{1}{2} \eta H + \sqrt{k^2 + (\eta^2 H^2)/4};$$

e vuol dire che la differenza di frequenza fra le due righe prodotte dal campo magnetico è semplicemente ηH.

E quindi si può dal fenomeno di Zeeman ricavare il valore di η; le misure hanno fornito

$$\eta = 1{,}77 \cdot 10^7.$$

Il quale numero, come si era annunciato, coincide quasi esattamente con quelli ricavati dalle esperienze sui raggi catodici.

È dunque evidente l'importanza della dinamica degli elettroni anche dal punto di vista dell'ottica.

§ 4. — *La massa elettromagnetica.* — Siamo giunti poco fa alla conclusione che la massa di un elettrone deve essere all'incirca duemila volte più piccola che la massa dell'atomo di idrogeno. Come si può conciliare questo modo di vedere con l'*ipotesi atomistica*, la quale ammette che l'atomo costituisca la parte più piccola e indivisibile della materia, tanto che non si incontrimo masse ponderali di minore grandezza dell'atomo stesso? Questa difficoltà scompare immediatamente se noi ammettiamo che l'elettrone non contenga materia, ma sia pura elettricità. Ma resterebbe a spiegare come l'elettrone abbia una certa, se pure piccola, inerzia.

Per comprendere ciò bisogna avere presente che l'elettrone in moto costituisce un elemento di corrente di convezione. Ora fu dimostrato da Rowland che la corrente di convezione produce un campo magnetico, equivalente a quello dovuto alla corrente di conduzione. E un tale campo deve pure contenere una certa quantità di energia, che cresce con la velocità dell'elettrone, come cresce con la velocità l'energia cinetica di una massa in movimento ($1/2.\ mv^2$).

L'energia magnetica di una corrente di conduzione ($1/2.\ LI^2$) fu indicata già da Maxwell come energia elettrocinetica, essendovi una certa corrispondenza fra la massa (m) e il coefficiente dell'autoinduzione (L) da una parte, e la velocità (v) e l'intensità (I) della corrente dall'altra.

Per far crescere la velocità di una particella in movimento dobbiamo ricorrere ad una forza proporzionale all'accelerazione ($m\ dv/dt$): e così, per far crescere l'intensità di una corrente di conduzione, bisogna far agire una forza elettromotrice, proporzionale alla variazione che l'intensità deve subire col tempo ($L\ dI/dt$). Questa analogia acquista appunto per la corrente di convezione una importanza particolare.

Si capisce che il campo magnetico, generato dall'elettrone in moto, deve reagire sopra di questo, come se esso possedesse una massa inerte; e si può quindi legittimamente parlare di una *massa apparente* o, meglio, *elettromagnetica* dell'elettrone.

Se ammettiamo che l'elettrone sia un aggregato di elettricità, che non ha inerzia (nel senso ordinario della parola), la piccolezza della sua massa non può essere considerata in contraddizione con l'ipotesi atomistica.

Questi atomi dell'elettricità hanno una massa solo in quanto producono intorno a loro un campo magnetico.

Si osservava innanzi che l'energia elettrocinetica dei raggî catodici lenti è uguale a $1/2 . mv^2$, dove m, la massa elettromagnetica, è una quantità costante.

Ma non è punto evidente che anche per velocità molto grandi l'energia elettrocinetica sia proporzionale al quadrato della velocità. E siccome le forze elettromagnetiche si propagano nello spazio con la velocità della luce (c), si potrebbe pensare che l'energia dipenda in un modo più complicato dal quoziente

$$\frac{v}{c} = \beta ;$$

e, come l'energia, potrà dipendere da questo rapporto anche la massa stessa.

L'ipotesi fondamentale della dinamica newtoniana, che cioè la massa rimanga costante, potrebbe non più verificarsi nella dinamica dell'elettrone. Ad ogni modo, se la dipendenza della massa dal quoziente β esiste, non si dovrà manifestare che per valori molto grandi della velocità, più grandi (diciamo) di $c/2$.

Questo concetto puramente speculativo cominciò ad acquistare una base sperimentale quando si studiarono le radiazioni emesse dal radio. I raggî β del radio, dei quali pure ha parlato il prof. Battelli, posseggono delle proprietà analoghe a quelle dei raggî catodici e una carica dello stesso ordine di grandezza, ma sono un po' meno deviabili nel campo magnetico.

Era naturale pensare che si avessero qui degli elettroni animati da una grandissima velocità; e realmente il Kaufmann potè dimostrare che queste particelle hanno una massa inerte dipendente dalla velocità.

Parliamo un poco del metodo, col quale furono eseguite le esperienze del Kaufmann sui raggî β.

Se si lascia passare la radiazione emessa da un granello di sostanza radioattiva attraverso ad un piccolo foro, si ottiene un fa-

scetto di raggi, nella direzione, per fissare le idee, dell'asse x e una traccia sopra una lastra fotografica, posta dietro al diaframma, e parallela al piano $(y.z)$.

Un campo magnetico normale ai raggî, diciamo secondo y, fa deviare i raggi β secondo z.

Per l'equazione (2) la curvatura dei raggî è data da

$$\rho = \eta \frac{H}{v}, \tag{2}$$

e dunque la deviazione è tanto minore quanto più grande è la velocità.

Ora siccome gli elettroni emessi dal radio hanno delle velocità comprese in un intervallo, che va da $c/2$ fino a c, invece di una semplice traccia si ottiene su la lastra una striscia, che costituisce per così dire uno *spettro magnetico* dei raggî stessi. Uno *spettro elettrico* perfettamente analogo si ottiene quando i raggî passano fra le armature di un condensatore.

Sia a il cammino percorso dai raggî nell'interno del condensatore (sempre nella direzione x); nel tempo $t = a/v$ nel quale il percorso viene compiuto gli elettroni ricevono per l'azione del campo elettrico E, che supponiamo secondo y, una accelerazione costante eE/m.

La deviazione secondo y alla fine del tempo t sarà

$$y = \frac{e\,E}{m} \cdot \frac{t^2}{2} = c\,\eta \cdot \frac{E\,a^2}{2\,v^2}. \tag{4}$$

Se ne deduce che anche la deviazione elettrica diminuisce al crescere della velocità, e anzi diminuisce più presto che la deviazione magnetica.

Nel metodo di Kaufmann i raggî β si assoggettano contemporaneamente all'azione del campo elettrico e del campo magnetico, in modo appunto che le due deviazioni riescano perpendicolari fra loro, vale a dire tenendo i due campi paralleli.

Allora ad ogni velocità v corrisponde una determinata deviazione elettrica y e una deviazione magnetica z, così che i tratti rettilinei su la lastra fotografica sono sostituiti da una linea curva.

Se η fosse una costante si avrebbe

$$y = \alpha \, . \, z^2,$$

vale a dire un ramo di parabola.

Ora, secondo le esperienze, la curva realmente ottenuta differisce dalla parabola, e dà modo di determinare sperimentalmente come la carica specifica dipenda dalla velocità.

In realtà si può dalle (2) e (4), essendo y e ρ conosciuti, calcolare v e η, avendosi

$$\frac{v}{c} = \beta = \frac{E}{H} \cdot \frac{a^2 \rho}{2\,y},$$

$$\eta = \frac{E}{H^2} \cdot \frac{c\,a^2 \rho^2}{2\,y}.$$

Così si poterono avere i valori corrispondenti di β e di $\eta = e/cm$.

Risultò che al crescere della velocità la carica specifica decresce sensibilmente; la e essendo costante si conclude che la massa m cresce con la velocità.

Queste ricerche, in quanto costituiscono una obbiezione sperimentale contro la seconda legge di Newton, suggeriscono alla fisica matematica la necessità di rivedere i postulati fondamentali della meccanica.

§ 5. — *Massa longitudinale e massa trasversale.* — Ammettiamo intanto che nella meccanica degli elettroni continuino a valere il *principio della conservazione dell'energia* e il *principio della quantità di moto*. Ma supponiamo poi che l'*energia* W sia una funzione, indeterminata, per il momento, della velocità. Parimenti dipenderà dalla velocità la *quantità di moto* G dell'elettrone. A quest'ultima si attribuisce la direzione stessa della velocità.

Consideriamo adesso un elettrone in moto lungo una certa trajettoria s; sia K_s la componente della forza esterna secondo la tangente.

Potremo scrivere

$$\frac{d\,W}{d\,t} = v\,K_s\,,$$

vale a dire: l'incremento dell'energia è uguale al lavoro della forza esterna K. E poichè W dipende solamente da v, sarà anche

$$\frac{d\,W}{d\,v} \cdot \frac{d\,v}{d\,t} = v\,K_s.$$

Questa relazione fra *forza longitudinale* (K_s) e *accelerazione longitudinale* (dv/dt) si può mettere sotto la forma

$$m_s\,\frac{d\,v}{d\,t} = K_s,$$

con

$$m_s = \frac{1}{v} \cdot \frac{d\,W}{d\,v} \tag{5}$$

La quantità m_s tiene dunque il posto della massa, ma ha un significato solamente finchè si tratta della componente longitudinale della forza; si può dunque indicarla col nome di *massa longitudinale*.

Il comportamento dell'elettrone per una accelerazione normale alla traiettoria, come per esempio nel caso della deviazione magnetica, non si può più determinare col principio della conservazione dell'energia.

Qui siamo costretti a ricorrere al principio della quantità di moto, secondo il quale le componenti K_s K_r della forza esterna sono uguali agli incrementi delle componenti corrispondenti della quantità di moto, divisi per il tempuscolo nel quale si verificano.

E siccome la quantità di moto coincide in direzione con la velocità, si ha per la componente longitudinale

$$\frac{d\,G}{dt} = K_s,$$

oppure, essendo G funzione della sola v,

$$\frac{d\,G}{d\,v} \cdot \frac{dv}{dt} = K_s,$$

e dunque

$$m_s = \frac{d\,G}{dv}, \tag{6}$$

che è un'altra espressione della massa longitudinale.

Per determinare la componente trasversale dell'accelerazione consideriamo una trajettoria curvilinea e costruiamo il suo cerchio osculatore, di raggio r.

Mentre l'elettrone descrive la trajettoria la tangente alla trajettoria stessa ruota con la velocità angolare

$$\frac{v}{r} = v\,\rho,$$

essendo ρ, come prima, la curvatura.

Colla stessa velocità angolare ruota anche la direzione della quantità di moto; dunque l'incremento che questa subisce secondo la normale è

$$G \,.\, \frac{v}{r} \,.\, dt,$$

e però possiamo scrivere, per il principio invocato,

$$G \cdot \frac{v}{r} = K_r.$$

Nella meccanica ordinaria si avrebbe

$$G = m\, v,$$

e quindi

$$\frac{m\, v^2}{r} = K_r.$$

Anche la nostra equazione più generale si riduce a questa forma ponendo

$$m_r = \frac{G}{v}; \tag{7}$$

allora la componente normale dell'accelerazione è determinata infatti dalla

$$\frac{m_r\, v^2}{r} = K_r.$$

La quantità m_r si può dunque definire come *massa trasversale.*

Dalle equazioni (6) e (7) si ricava che la massa longitudinale e la trasversale sono identiche solamente quando la quantità di moto (G) è proporzionale alla velocità (v); allora entrambe sono costanti e ricadiamo nel caso della meccanica ordinaria.

Infatti già Laplace aveva dimostrato che la massa, per essere indipendente dalla direzione del movimento, deve essere una costante; e considerava anzi questa osservazione come una prova della costanza della massa. Noi invece, dal fatto sperimentale che la massa dell'elettrone dipende dalla velocità, deduciamo inversamente che essa deve dipendere anche dalla direzione.

Si possono ottenere graficamente le due masse, costruendo una curva che rappresenti G in funzione di v.

Dalle esperienze di Kaufmann, che si riferiscono alla deviazione trasversale, si può dedurre per l'andamento di questa curva, che il quoziente G/v, cioè la massa trasversale, cresce con la velocità. Questo quoziente determina la tangente dell'angolo σ (fig. 44) che la corda OP fa con l'asse delle ascisse

Fig. 44

$$tg\, \sigma = G/v = m_r.$$

E la forma della curva è tale che il detto angolo cresca al crescere di v.

D'altra parte l'angolo θ, che fa con l'asse delle ascisse la tangente alla curva, determina la massa longitudinale

$$tg\,\theta = d\,G/d\,v = m_s\,.$$

Si ricava dalla figura che è sempre

$$tg\,\theta \geqq tg\,\sigma,$$

dunque

$$m_s \geqq m_r\,.$$

§ 6. — *La funzione di Lagrange.* — Per determinare le proprietà dinamiche dell'elettrone basta, come abbiamo veduto, conoscere G in funzione di v.

Ma una forma più evidente si può ottenere confrontando insieme le equazioni (5) e (6).

Allora si ha

$$\frac{1}{v} \cdot \frac{d\,W}{d\,v} = \frac{d\,G}{dv},$$

come condizione perchè il principio dell'energia e quello della quantità di moto portino allo stesso valore della massa longitudinale.

Ammettiamo che sia così; poniamo

$$v\,G - W = L,$$

e deriviamo rispetto a v.

Avremo

$$G = \frac{d\,L}{d\,v}, \tag{8}$$

e dunque

$$W = v\,\frac{d\,L}{dv} - L. \tag{9}$$

La funzione L si chiama la *funzione di Lagrange.*

In realtà il sistema della meccanica di Lagrange è tanto largo, che esso comprende anche la dinamica più generale che noi andiamo svolgendo. Le relazioni fra funzione di Lagrange, quantità di moto ed energia sono infatti conosciute dalla meccanica analitica.

Per le masse si ha

$$m_r = \frac{G}{v} = \frac{1}{v} \cdot \frac{d\,L}{d\,v}, \tag{10}$$

$$m_s = \frac{d\,G}{d\,v} = \frac{1}{v} \cdot \frac{d\,W}{dv} = \frac{d^2\,L}{dv^2}; \tag{11}$$

così la dinamica dell'elettrone è ricondotta alla determinazione della funzione di Lagrange per mezzo della velocità.

I metodi generali della meccanica non permettono però la determinazione di questa funzione; e per andare in fondo sarebbe necessario richiamarsi alle equazioni differenziali del campo elettromagnetico e alle leggi che determinano le forze meccaniche di questo campo.

Secondo le ipotesi che si fanno su la forma dell'elettrone si arriva naturalmente a diverse forme per la funzione di Lagrange.

E per esempio se si ammette che l'elettrone sia una sfera rigida, di raggio a, si trova

$$L = - \frac{e^2}{2a} \cdot \frac{1 - \beta^2}{2\beta} \cdot ln \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right) \tag{12}$$

Se si suppone invece, con Lorentz, che l'elettrone durante il moto subisca una contrazione in senso longitudinale, proporzionale a

$$\sqrt{1 - \beta^2},$$

si ottiene

$$L = - \frac{e^2}{2a} \cdot \sqrt{1 - \beta^2}. \tag{13}$$

Malgrado la differenza delle espressioni analitiche la legge, secondo la quale le masse dipendono dalla velocità, è simile nei due casi, così che l'esperienza non permette finora di scegliere fra l'una e l'altra teoria.

§ 7. — *La pressione della radiazione.* — Noi abbiamo, nel primo paragrafo, distinto due specie di radiazioni: radiazione per onde e radiazione per convezione. I principi della meccanica elettromagnetica, dei quali intendiamo discorrere adesso, sono applicabili all'una e all'altra; però si possono esporre con maggiore semplicità ragionando sulla radiazione per onde, e di questa appunto ci vogliamo occupare anzitutto.

Consideriamo un'onda piana elettromagnetica, polarizzata rettilineamente e propagantesi nello spazio vuoto; secondo la teoria di Maxwell il vettore elettrico E e il vettore magnetico H sono fra loro perpendicolari e hanno la medesima grandezza.

Noi prendiamo l'asse y nella direzione di E e l'asse z nella direzione di H; l'onda allora si propaga parallelamente all'asse x.

Sarà, per esempio,

$$E = H = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{\tau} - \frac{x}{\lambda}\right),$$

essendo a l'*ampiezza,* τ il *periodo* e λ ($= c\,\tau$) la *lunghezza d'onda.*

Lo spazio attraversato dalle radiazioni contiene, secondo la teoria del campo elettromagnetico, una certa quantità di energia; la *densità cubica* di essa, cioè la quantità contenuta nell'unità di volume, è

$$\Psi = \frac{1}{8\pi} E^2 + \frac{1}{8\pi} H^2 = \frac{1}{4\pi} a^2 \sin^2 2\pi \left(\frac{t}{\tau} - \frac{x}{\lambda}\right).$$

Poichè l'onda, e quindi anche l'energia, si muove, con la velocità c, parallelamente all'asse delle x, passerà attraverso all'unità di superfice in un piano normale a quest'asse, nell'unità di tempo, un *flusso di energia*

$$S = c\,\Psi = \frac{c}{4\pi} a^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{t}{\tau} - \frac{x}{\lambda}\right);$$

questo misura la radiazione che cade su la detta superfice.

Si arriva al medesimo valore di S ponendo

$$S = \frac{c}{4\pi} E\,H,$$

e si può dimostrare che questa espressione continua a valere qualunque sia il campo. Solamente, se i due vettori non sono perpendicolari fra loro, bisogna ancora aggiungere al secondo membro il fattore $\sin\alpha$, α essendo l'angolo compreso fra le due direzioni. Con questa correzione il valore del flusso di energia diventa

$$S = \frac{c}{4\pi} E\,H \sin\alpha, \tag{14}$$

ed è dunque proporzionale all'area del parallelogramma costruito sui due vettori E e H, normalmente al piano del quale l'energia si muove.

Tale risultato, che Poynting dedusse dalla teoria di Maxwell, va appunto sotto il nome di *teorema di Poynting.* Per un'onda luminosa il *vettore di Pointing* dà la direzione del raggio e il valore della radiazione.

Anche l'elettrone in movimento dà un simile flusso di energia, perchè in esso terminano delle linee di forza elettrica e, d'altra parte,

intorno alla direzione del suo movimento esistono delle linee circolari di forza magnetica.

E anche in questo caso il flusso dell'energia si può calcolare col teorema di Poynting.

Vediamo ora di occuparci in particolare delle azioni meccaniche delle radiazioni. Quanto alla radiazione per onde è ben noto che essa esercita un'azione meccanica, alla quale si dà il nome di *pressione luminosa*. L'esistenza di tale pressione fu trovata la prima volta dal Bartoli per mezzo di considerazioni termodinamiche e dedotta poi, per opera del Maxwell, dalla teoria elettromagnetica della luce. Boltzmann, riunendo insieme i due processi, potè ottenere alcuni risultati sul calore raggiante, che furono più tardi confermati dall'esperienza.

La pressione luminosa fu del resto riscontrata sperimentalmente dal fisico russo Lebedew e dagli americani Nichols e Hull.

Consideriamo una lastra A, e supponiamo che essa emetta luce verso la destra (avendo a sinistra una superfice speculare).

Allora la lastra subisce, per l'azione della luce, una forza diretta da destra verso sinistra, alla quale non corrisponde nessuna *reazione* simultanea.

Solamente quando la luce viene a cadere sopra una seconda lastra, B, capace di assorbirla, la reazione si manifesta; ma questo succede dopo il tempo

$$T = \frac{d}{c},$$

ove con d si indichi la distanza fra le due lastre.

Il *terzo assioma* della meccanica newtoniana resta quindi in difetto, perchè esso esigerebbe che ad ogni azione corrispondesse una reazione simultanea.

Ne segue ancora che in un sistema di corpi materiali la quantità di moto risultante non è costante. Immediatamente dopo l'emissione A ha una quantità di moto verso sinistra; e soltanto dopo il tempo T essa viene compensata da una quantità di moto, diretto verso destra, della lastra B.

Come il principio della quantità di moto anche il principio dell'energia cessa di valere in questo caso, almeno nel senso ordinario: l'energia del nostro sistema materiale non rimane costante, ma una

parte di essa diviene latente nell'intervallo che occorre alla luce per percorrere lo spazio d.

Questa parte latente si chiama *energia luminosa*, e se se ne tiene conto nella somma il principio dell'energia continua a valere.

Ora, come si parla di energia della luce, si può parlare anche di un *impulso luminoso* o di una *quantità di moto elettromagnetica*. Allora anche il principio della quantità di moto si può salvare, nel senso che resta costante la somma delle quantità di moto meccanica ed elettromagnetica. Nel fenomeno dell'emissione una certa quantità di moto viene lanciata nello spazio sotto forma elettromagnetica; nell'assorbimento invece la quantità di moto elettromagnetica si trasforma in meccanica.

Quale sarà la legge quantitativa che determina l'impulso della radiazione per onde?

Come direzione assumiamo quella della radiazione stessa, e come grandezza riferita all'unità di volume troviamo, con calcoli che non è qui il luogo di riferire,

$$g = \frac{S}{c^2}. \tag{15}$$

Se la luce cade normalmente sopra un piano l'unità di superfice riceve nell'unità di tempo la quantità di moto contenuta in un cilindro avente l'altezza c, e cioè:

$$gc = \frac{S}{c} = \Psi.$$

Questa quantità di moto viene assorbita dalla superfice, se essa è nera, e la superfice si trova dunque assoggettata alla pressione

$$p = \Psi,$$

uguale alla densità dell'energia, come fu già indicato da Maxwell.

La forma (15) della *densità* dell'impulso si può applicare anche al caso di una radiazione per convezione. Allora la quantità di moto che l'elettrone porta con sè si determina integrando in tutto il campo l'espressione (15):

$$\begin{aligned} G &= \iiint_{-\infty}^{+\infty} dx\, dy\, dz \,.\, g, \\ &= \frac{1}{c^2} \iiint_{-\infty}^{+\infty} dx\, dy\, dz \,.\, S, \end{aligned} \tag{16}$$

e di qui si ricava, come abbiamo visto a suo tempo, la massa elettromagnetica.

§ 8. — *Massa ed energia.* — L'esistenza della massa elettromagnetica è per sè stessa in contraddizione col terzo assioma della meccanica di Newton. Perchè, secondo questo assioma, la risultante delle forze che un corpo esercita sopra di sè dovrebbe essere uguale a zero. Questa contraddizione in fondo si manifesta già nella meccanica ordinaria, quando, nel senso del principio di d'Alembert, si introduce la forza d'inerzia

$$-\frac{d^2 x}{d t^2} m;$$

propriamente il terzo assioma non si dovrebbe applicare alle forze d'inerzia; queste vanno portate nel membro di sinistra, e il principio di azione e reazione si deve limitare alle forze che rimangono nel membro di destra.

Nello stesso modo in cui si trattano le forze d'inerzia della meccanica ordinaria si devono trattare anche le forze, che nascono dalla quantità di movimento elettromagnetica. Così si giustifica l'applicazione che del principio della quantità di moto abbiamo fatto nel quinto paragrafo.

Se ci limitiamo a *moti lenti*, nei quali β^2 sia trascurabile, e l'elettrone, secondo le due ipotesi ricordate, si possa considerare come una sfera su la quale la carica è distribuita simmetricamente, viene per la massa la formola

$$m_0 = \frac{4}{3} \frac{W_0}{c^2},$$

dove, nel caso di una distribuzione superficiale,

$$W_0 = \frac{e^2}{2a}$$

è l'energia elettrostatica della sfera in riposo. La massa elettromagnetica è dunque proporzionale all'energia corrispondente al riposo, e il fattore di proporzionalità $4/3\, c^2$ è molto piccolo; la detta energia deve essere quindi assai grande perchè la massa abbia un valore sensibile.

Di qui nasce il concetto che la proporzionalità fra massa ed energia abbia un significato generale, che trascenda i limiti della dinamica dell'elettrone.

Le leggi della conservazione dell'energia e della conservazione della massa si potrebbero allora concepire come una legge unica. E si potrebbe anche considerare la massa della materia come generata dall'energia, che la materia possiede.

Però le quantità di energia, che si manifestano sotto la forma termica nelle reazioni chimiche, sono troppo piccole per poter dare, quando vengano divise per c^2, il valore della massa.

Bisogna ammettere che quantità di energia molto maggiori siano contenute nell'interno degli atomi, per modo che fino a quando l'atomo non cambia la sua struttura esse non si possono manifestare; per poterle rendere libere bisognerebbe distruggere l'atomo.

Ora si suppone appunto che nel processo della radioattività si verifichino tali modificazioni di struttura, e qui infatti si rendono libere delle quantità di energia, che superano di molto quelle corrispondenti ai processi chimici.

Che l'energia contenuta nell'atomo sia molto grande lo si deduce del resto dal fatto che le forze interne dell'atomo sono capaci di imprimere alle particelle α e β delle velocità dell'ordine di grandezza della velocità della luce. Si può dunque a buon diritto attribuire all'atomo una tale quantità di energia, che, divisa per c^2, possa fornire il valore esatto della massa.

Nella deduzione della formola testè discussa si è tenuto conto solamente di quel flusso di energia, che scorre nel campo circondante l'elettrone.

Ma anche nell'interno dell'elettrone vi sarà un flusso di energia; perchè esso si trova, sotto l'azione delle forze elettriche, in uno stato analogo a quello di una fune tesa.

Come una fune tesa e impiegata a sollevare un peso trasmette dell'energia in direzione opposta a quella del suo movimento, così anche nell'interno dell'elettrone vi sarà un flusso di energia *in direzione retrograda.*

Questa corrente di energia, che risulta dai legami cinematici dell'elettrone, possiede essa pure, secondo una ipotesi di Planck, una quantità di moto calcolabile con la formola (15). Se si tien conto

anche di questa, la quantità di moto, e quindi la massa, dell'elettrone diminuiscono un poco.

Non è difficile calcolare il valore della massa, che corrisponde a tale ipotesi.

Consideriamo un elettrone in moto uniforme secondo l'asse x; attraverso ad un piano normale al detto asse passerà nel tempo dt una quantità di energia

$$dt \iint_{-\infty}^{+\infty} dy\, dz \,.\, S.$$

Integrando da $-\infty$ a $+\infty$ si ottiene l'energia complessiva dell'elettrone

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dt \iint_{-\infty}^{+\infty} dy\, dz \,.\, S = W.$$

Ora il tempo dt nel quale lo strato di altezza dx passa attraverso al piano è dato da

$$dt = \frac{dx}{v};$$

si ottiene dunque

$$\iiint_{-\infty}^{+\infty} dx\, dy\, dz \,.\, S = v\, W.$$

L'integrazione va estesa a tutto lo spazio e cioè al flusso di energia, che esiste nel campo esterno e nell'internò dell'elettrone medesimo.

Secondo l'equazione (16) la quantità di moto risulta

$$G = \frac{v\, W}{c^2}. \tag{17}$$

Ma per piccole velocità si ha $W = W_0$, dunque

$$G = \frac{v\, W_0}{c^2},$$

e

$$m_0 = \frac{G}{v} = \frac{W_0}{c^2};$$

il fattore 4/3 viene così ad essere sostituito dall'unità.

Noi possiamo ancora dalla relazione (15), generalizzata nel senso di Pilanck, dedurre la dipendenza della funzione di Lagrange dalla velocità, senza fare nessuna ipotesi su la forma dell'elettrone.

Poniamo, d'accordo coi risultati del sesto paragrafo (eq. 8 e 9),

$$\begin{cases} G = \dfrac{dL}{dv}, \\ W = v\dfrac{dL}{dv} - L, \end{cases}$$

seguirà dalla (17)

$$\frac{dL}{dv} = \frac{v}{c^2}\left(v\frac{dL}{dv} - L\right),$$

cioè

$$(1-\beta^2)\frac{dL}{d\beta} = -\beta L,$$

e successivamente

$$\frac{d \log L}{d\beta} = -\frac{\beta}{1-\beta^2},$$

$$= \frac{1}{2}\frac{d}{d\beta}\log(1-\beta^2),$$

e integrando

$$L = L_0\sqrt{1-\beta^2} = -W_0 . \sqrt{1-\beta^2}. \tag{18}$$

E però si è condotti alla forma della funzione di Lagrange, che corrisponde all'ipotesi di Lorentz.

Per la quantità di moto si ottiene poi l'espressione

$$G = \frac{1}{c}\cdot\frac{dL}{d\beta} = \frac{v W_0}{c^2\sqrt{1-\beta^2}},$$

$$= \frac{v m_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

per l'energia

$$W = \frac{c^2}{v}\cdot G = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

$$= \frac{W_0}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

e per le masse

$$m_r = \frac{m_0}{(1 - \beta^2)^{1/2}},$$

$$m_s = \frac{m_0}{(1 - \beta^2)^{3/2}}.$$

Questi valori delle masse trasversale e longitudinale coincidono con quelli che si deducono dal cosidetto *principio di relatività*. Realmente Lorentz ha dimostrato che, attribuendo alle masse i detti valori, si può, con la teoria degli elettroni, spiegare l'indipendenza di certi fenomeni ottici dal movimento della terra. Ma l'insistere sopra questo argomento ci porterebbe troppo lontano.

ANGELO SCRIBANTI

I SOMMERGIBILI

§ 1. — *Sommergibili e sottomarini.* — Uno scafo ideato e costruito in vista della possibilità di essere impiegato a volontà nella navigazione in superficie e in quella subacquea si chiama in generale un *sommergibile*; esso quando è adoperato nella navigazione alla superficie dell'acqua rientra nel caso degli ordinarii *galleggianti*, mentre costituisce più propriamente un *sottomarino* allorchè è fatto navigare sott'acqua. È però da notare che nel comune linguaggio tecnico agli scafi impiegabili nella navigazione subacquea si attribuisce convenzionalmente il nome di sommergibili o di sottomarini secondo che in essi le qualità tecniche relative alla navigazione in superficie nel loro complesso prevalgono o no su quelle inerenti alla navigazione in immersione: in questo senso non esiste una linea di confine ben definita fra le due classi di scafi. Del resto la distinzione, che è convenzionale, tende a scomparire dalla pratica di questo ramo della tecnologia navale, e da molti ora, come vuole il significato naturale delle parole, si attribuisce a un medesimo scafo l'appellativo di sommergibile o di sottomarino secondochè per esso si vuole accennare al fatto potenziale o al fatto effettivo della sommersione.

§ 2. — *Caratteristiche dei sottomarini.* — Come è noto, le qualità tecniche di una nave qualsiasi dipendono dalle sue attitudini alla velocità alla percorrenza alla portata all'abitabità, dal suo grado di sicurezza in genere e sopra tutto dalla sua grandezza assoluta, in quanto che questa è l'elemento che permette di esplicare tutti gli altri. Identici sono gli elementi che influiscono sopra le qualità tecniche di uno scafo impiegabile nella navigazione subacquea e le determinano; se a questo riguardo vi è una distinzione da fare tra il naviglio sommergibile e il naviglio ordinario, questa consiste in

ciò che nel naviglio sommergibile ognuna delle qualità deve essere studiata e assicurata in doppio modo, cioè tanto in riguardo alla navigazione in superficie quanto in riguardo a quella in immersione e in modo che l'assegnazione di un elemento in una delle due forme di navigazione non torni a soverchio discapito dello stesso o degli altri elementi nell'altra forma di navigazione.

È bene stabilire subito le idee intorno a ciò che dal naviglio sommergibile si pretende mediamente oggidì in materia di velocità, autonomia e portata, dove per portata intendiamo in modo espresso l'armamento guerresco, poichè per ora e forse per molti anni ancora il naviglio di questa specie non viene considerato e costruito altrimenti che in vista di applicazioni militari. Senza discutere le singole cifre, riferisco che al momento presente si ritiene dai competenti che un sommergibile riunisce in sè un soddisfacente complesso di fattori di potenza militare, allorchè nella navigazione in emersione è capace di raggiungere una velocità massima di circa quindici nodi e di mantenervi per non meno di centoventicinque ore una velocità di circa otto nodi percorrendo senza rifornirsi di combustibile una distanza di circa mille miglia, e allorchè nella navigazione in immersione è capace di tenere per due o tre ore una velocità massima prossima agli otto nodi e di navigare per circa dieci ore a una velocità di circa cinque nodi coprendo una distanza di circa cinquanta miglia senza bisogno di rinnovare l'energia in sè stesso accumulata. Quanto all'armamento si ritiene di solito il sommergibile in grado di adempiere al suo ufficio militare quando possegga due tubi di lancio, ognuno provvisto di due siluri: è stato concepito il disegno di dotare il sommergibile di un cannoncino da far eventualmente entrare in azione nella navigazione in superficie, ma per ora l'unica arma del sommergibile è costituita dal siluro, che esso adopera in modo analogo a quello della torpediniera e con questa sola differenza sostanziale che, mentre l'azione offensiva della torpediniera non può svolgersi con sicurezza che nella notte, il sommergibile al contrario, per potersi servire utilmente della sua arma, ha bisogno della chiarezza del giorno per poter riconoscere l'avversario, pur rimanendogli occulto e invulnerabile.

L'esperienza dimostra che gli accennati valori dei singoli fattori della potenza tecnica e militare di un sommergibile si possono

accoppiare fra loro e con un soddisfacente complesso di qualità inerenti alla stabilità, dirigibilità e abitabilità mediante scafi aventi la grandezza di poco meno che duecento tonnellate in emersione e poco più che duecento cinquanta in immersione. Tale, o poco differente, è la grandezza media di molti fra i moderni sommergibili: ma non è da tacere che nei decenni in cui il concetto di sommergibile non si era ancora assodato nella forma presente e si aveva in mira piuttosto il puro sottomarino che il sommergibile, ne furono costruiti di grandezze assai minori e varie, p. es. di dieci, di trenta, di cinquanta, di cento tonnellate, si intende con corrispettiva rinunzia parziale o totale a qualcuno dei suaccennati fattori di velocità e percorrenza sopracquea e subacquea. Per contro ne furono costruiti o concepiti altri di mole assai maggiore, per esempio di quattrocento e persino di ottocento tonnellate; ma si trova riferito che in questi sommergibili di gran mole, mentre non potè essere conseguito un sensibile beneficio nella velocità e nella percorrenza in superficie, che sono fattori capitali del valore del sommergibile nel suo impiego strategico, fu notato un peggioramento nelle qualità inerenti alla facilità e sicurezza di manovra e all'altezza dell'acqua occorrente alla loro libera manovra, altezza che diventa maggiore non tanto a causa delle cresciute dimensioni trasversali dello scafo quanto della maggiore ampiezza delle escursioni lineari compiute nelle oscillazioni longitudinali dalle estremità di uno scafo più lungo. Questo peggioramento forse annulla il beneficio che la aumentata mole permetterebbe di conseguire nella moltiplicazione dell'armamento e nella velocità subacquea, la quale per gli scopi del buon impiego tattico del sommergibile, per la sicurezza delle manovre che esso ha da compiere sott'acqua e per l'economia della propulsione subacquea non importa affatto che superi i valori più sopra accennati come rispondenti ai desiderati abituali.

§ 3. — *Forma dello scafo.* — Fissate le idee intorno alla grandezza utilmente assegnabile a un sommergibile in rapporto a un dato programma di velocità, autonomia e armamento, sorge, forse per prima fra le questioni che riguardano questo tipo di naviglio, la questione della forma da scegliere per lo scafo. Qui, come in generale avviene per ogni questione di architettura navale, la scelta non può dipendere che da un

equo compromesso fra esigenze antagoniste: l'attitudine e l'economia della navigazione sopracquea consiglierebbero l'adozione integrale delle forme che hanno dato buoni risultati nel naviglio torpediniero e assicurano negli scafi galleggianti una normale misura di resistenza al moto: l'economia della navigazione subacquea tenderebbe a far preferire le forme a sigaro, alle quali intuitivamente si presume inerente un valor minimo della resistenza al moto per i corpi completamente immersi. Queste ultime forme, che sovente furono realizzate a foggia di solidi di rivoluzione simmetrici nel senso di poppa-prua, ebbero di fatto la preferenza in moltissime costruzioni del naviglio sottomarino, che furono così a scafo fusiforme, e ciò non soltanto per la presunta proprietà di possedere la minima resistenza al moto subacqueo, ma ancora per la presunzione di possesso di una miglior attitudine a resistere alle azioni schiaccianti della pressione dell'acqua nello stato di immersione. Accanto agli scafi fusiformi ebbero voga quelli pisciformi cioè con forme desunte per imitazione da quelle proprie del corpo dei pesci veloci: l'imitazione della natura rappresentava qui una illusione, un arbitrario trasporto dei dati della natura a condizioni di grandezza e velocità relative non suscettibili di comparazione fra il pesce e il sottomarino, avuto anche riguardo al mezzo di locomozione e alla flessibilità dell'uno per niun modo paragonabili al mezzo di propulsione e alla rigidezza dell'altro. Del resto la constatazione della assoluta manchevolezza di stabilità longitudinale negli scafi dei sottomarini a fuso nella navigazione in superficie, manchevolezza che si rende particolarmente evidente e pericolosa ai primi istanti della manovra di affondamento quando più è necessario essere padroni dei movimenti dello scafo, il riconoscimento del cattivo comportamento delle forme a fuso e a pesce nei riguardi della resistenza al moto nella navigazione in superficie, l'ineluttabile necessità di distruggere la simmetria del fuso e la genuinità della originaria forma a pesce in conseguenza della applicazione di appendici di carena quali sono le torricelle di comando, le mastre di boccaporti, i tubi d'areazione e visione, i piani di stabilizzazione ed altro, infine la constatata inadattabilità della forma di rivoluzione a permettere una buona disposizione e utilizzazione degli spazi interni, furono tutti elementi per i quali le forme testè indicate vennero via via abbandonate e cedettero il

passo alle forme ora comunemente adottate, con le quali lo scafo di un sommergibile ricorda assai da vicino le forme preferite per il naviglio torpediniero o se ne discosta solo in quanto sia necessario per assicurargli anche una buona manovrabilità subacquea.

La transizione dalle forme a fuso o a pesce, (le quali ultime differivano dalle prime essenzialmente per avere il corpo anteriore notevolmente più gonfio del corpo poppiero, ma del resto avevano di solito comune con le prime, la forma circolare delle sezioni trasversali) avvenne con differenti stadii di esplicazione del tipo di struttura dello scafo. La nozione, comune anche ad altri rami di tecnologia, dell'essere la forma circolare delle sezioni trasversali quella che più sicuramente e più economicamente di ogni altro guarentisce la robustezza di struttura di un corpo esposto alla pressione di un fluido, non consentì per parecchio tempo ai costruttori di sommergibili di rinunziare alla circolarità delle sezioni dello scafo resistente; da principio essi risolvettero la questione della associazione di forme atte alla navigazione in immersione con altre atte alla navigazione in superficie ricorrendo al ripiego di formare dapprima uno scafo a sezioni circolari, scafo navigante sott'acqua e ivi resistente alle pressioni, e poi sovrapporgli in tutta la sua lunghezza una sovrastruttura leggera, da mantenere stagna nella navigazione in superficie, da lasciarsi liberamente allagare, ossia da inutilizzare in quella subacquea, venendo così a formare mediante l'insieme dello scafo resistente inferiore e della sovrastruttura leggera, mantenuta stagna, lo scafo navigante in superficie.

In seguito il ripiego, senza cambiare natura, mutò aspetto: in luogo di sovrapporre alla parte alta dello scafo fusiforme una sovrastruttura leggera allagabile in immersione, fu trovato più conveniente di circondare tutto lo scafo fusiforme con una controstruttura leggera, riproducente le forme esterne di uno scafo da torpediniera e costituente fra il proprio involucro e quello dello scafo resistente interiore una intercapedine da allagare in immersione, da potersi a guisa di un ordinario doppio fondo utilizzare come deposito di combustibile e come elemento di protezione contro gli urti e le lacerazioni. Questa soluzione del doppio scafo, uno esterno leggero e navigante in superficie, l'altro interno robusto e resistente alle pressioni in immersione, fu un notevole progresso, ottenuto però, a parità

delle dimensioni esterne dello scafo, con scapito della buona utilizzazione dello spazio, con sacrificio dell'economia del peso della struttura e con soverchio dispendio delle quantità di zavorra da imbarcare all'atto della manovra di affondamento.

La vera, la buona soluzione del problema non fu trovata se non quando il nostro ingegnere Laurenti con geniale pensiero ideò una struttura di scafo da sommergibile nella quale lo scafo interno e l'esterno, in luogo di adempiere ciascuno separatamente e indipendentemente a una data funzione, si integrassero a vicenda nei riguardi delle complesse e varie esigenze del servizio di un sommergibile. In vece di avere uno scafo leggero involgente uno scafo resistente o ad esso sovrapposto e non contribuente alla robustezza generale delle struttura, il Laurenti volle che si avesse uno scafo unico, non molto lontano dall'ordinario tipo dei bastimenti a doppio fondo, nel quale fasciame interno ed esterno concorressero egualmente alla resistenza trasversale in modo da rendere minimo il peso morto della struttura. L'economia di peso realizzata mediante il mutuo concorso dei due fasciami di scafo compensò l'aumento di peso cui nei precedenti tipi di struttura avrebbe esposto la adozione di forme di scafo meno adatte a sopportar pressioni che non siano le forme a sezioni trasversali circolari: per tale modo il Laurenti potè introdurre nel naviglio sottomarino gli attuali tipi di struttura, nei quali le forme esterne dello scafo sono analoghe a quelle di una torpediniera come le più adatte alle esigenze della velocità in superficie, mentre il fasciame interno del doppio fondo - dove esiste - vi è sagomato in modo da permettere una buona utilizzazione dello spazio agli scopi della sistemazione dei varii elementi del macchinario motore e agli scopi della comoda abitabilità di tutte le parti del battello, la quale non era assolutamente compatibile con la foggia fusiforme dello scafo.

Ho detto il fasciame interno del doppio fondo « dove esiste », poichè nelle parti estreme dello scafo la sottigliezza delle forme permette di conseguire sufficiente robustezza di struttura anche senza estendere ad esse il doppio fondo: la limitazione dell'estensione di questo, in confronto di tipi a sovrastruttura o controstruttura generale, costituisce di per sè un beneficio nei riguardi della celerità della manovra di affondamento.

§ 4. — *Struttura e robustezza dello scafo.* — La robustezza di struttura propria dello scafo di un sommergibile deve essere proporzionata alla pressione idrostatica che lo scafo dovrà sostenere alla massima profondità alla quale si prevede che esso debba navigare o stazionare. Normalmente la profondità di navigazione subacquea non ha bisogno di essere grande, basta che sia tale che il sottomarino nasconda con sè stesso sotto il pelo dell'acqua tutte le sue appendici di coperta e cioè si trovi col dorso alla profondità di 4 o 5 metri; eventualmente la profondità potrà dover esser tale da permettergli di passare non visto sotto la carena di una nave nemica della maggior pescagione possibile e allora quella profondità dovrà salire a venti o venticinque metri. Navigazioni in profondità maggiore non sembra doversene considerare, fino a che non occorrerà ai sottomarini di sfuggire alla ispezione degli apparecchi di navigazione aerea; ma poichè in ogni opera di ingegneria si vuole sempre provvedere un margine di sicurezza e poichè è prudente e doveroso antivenire i sinistri effetti di un involontario affondamento oltre i limiti ordinarii, è omai accertato come norma convenzionale che lo scafo di un sottomarino debba avere robustezza di struttura e sicurezza di condizione stagna quanta ne occorre perchè esso possa sostenere senza inconvenienti la profondità di quaranta, meglio cinquanta, metri d'acqua marina. Le teorie della resistenza dei materiali applicate allo studio degli archi elastici permettono di assoggettare a calcolo preventivo la robustezza dello scafo sommergibile imaginandolo costituito da una serie di anelli trasversali soggetti sul loro contorno a una pressione normale uniforme corrispondente alla surriferita profondità; la abitudine recente di usare in questi scafi l'acciaio ad alta resistenza, la introduzione del tipo di struttura a fasciame esterno e interno mutuamente integrantisi mediante collegamenti reticolari di tralicci e irrobustiti da paratie e puntelli, la cura minuziosa della costruzione della chiodazione e della calafatura dei fasciami, non minore di quella impiegata nella costruzione degli involucri da caldaie, permettono di ottenere degli anelli e dei fasciami sufficientemente robusti per dar luogo a scafi sommergibili, i quali nella prova di immersione a gran profondità, che precede la ammissione in servizio di ogni nuova unità, non presentano inconvenienti derivanti, non che da debolezza di struttura, nemmeno da imperfezione dell'erme-

ticità. Il che rilevo anche per avere occasione di notare che in questo, come in tanti altri punti della tecnologia del naviglio sottomarino, la cura scrupolosa del particolare di costruzione e di rifinimento assurge ad altrettanta importanza che la scelta sagace degli elementi generali del progetto e della struttura. Su un altro punto mi giova richiamare l'attenzione, ed è che, analogamente a quanto dirò accadere per le condizioni di stabilità, vi è nei riguardi della robustezza di struttura una inversione di comportamento fra lo scafo di un ordinario bastimento galleggiante e quello di un sottomarino; nel primo le maggiori sollecitazioni di struttura sono provocate dalla distribuzione longitudinale delle spinte e dei pesi e la robustezza dell'ossatura trasversale non dà luogo in generale a speciali preoccupazioni: nel secondo sono principalmente la robustezza dell'ossatura trasversale e gli sforzi locali sul fasciame nell'intervallo delle maglie quelli che vogliono essere oggetto di calcolo o di determinazione sperimentale.

§ 5. — *Riserva di galleggiabilità: sommersione.* — Chi vuole procurarsi un'idea del funzionamento dei sommergibili, deve anzi tutto acquistar nozione del modo col quale essi passano dallo stato di galleggianti ordinarii a quello di sottomarini, ossia dallo stato di emersione a quello di immersione.

Uno scafo qualsiasi galleggiante alla superficie dell'acqua, e quindi anche quello di un sommergibile, possiede una certa riserva di galleggiabilità, misurata in valore assoluto dal volume degli spazi chiusi sovrastanti alla linea di galleggiamento e in valor relativo individuata numericamente dal rapporto fra il volume di detti spazi e il volume di carena ossia della porzione di scafo sottostante alla linea di galleggiamento. Nel naviglio ordinario l'intensità della riserva di galleggiabilità dipende dalla natura del galleggiante; e così nei bastimenti del commercio essa varia dal venticinque al settanta per cento secondo che trattasi di scafi piccoli o grandi; valori più alti sono talora imposti dalle speciali esigenze dei piroscafi da passeggeri; nel naviglio militare esso varia grandemente da una classe all'altra, da un minimo del dieci per cento nei monitors, a un valor medio del cinquanta per cento nelle corrazzate un po' antiche, a un valore del cento e più per cento nel naviglio da crociera e moderno; nelle torpediniere è mediamente del sessanta per cento.

Una riserva di galleggiabilità o, come dicesi, di spinta esiste anche nel naviglio destinato alla navigazione subacquea; il suo valore varia da tipo a tipo e anzi a taluni serve ora di criterio numerico per la classificazione di questo naviglio. Quando non supera il cinque, al più il dieci per cento, come era nei primi scafi costruiti in vista dell'idoneità esclusiva, o almeno essenziale, alla navigazione subacquea, dà luogo al tipo che più propriamente prende il nome di sottomarino; quando ammonta al venti, trenta o più per cento, costituisce più propriamente il moderno sommergibile, dal quale si pretende che, quando naviga in superficie conservi molte delle qualità del naviglio torpediniero, cui per la sua funzione militare appartiene; quando, come con geniale artifizio pure del Laurenti è ottenuto nei sommergibili di costruzione italiana, realizza un valore di circa il sessanta per cento, allora le qualità nautiche del sommergibile naviganti in superficie non differiscono sensibilmente da quella di un'ordinaria torpediniera: esso risulta allora particolarmente adatto a tenere il mare e a fronteggiarlo anche se sia agitato; nella nostra nomenclatura ufficiale esso prende allora il nome di torpediniera sommergibile.

Qualunque sia l'ammontare della riserva di galleggiabilità posseduta in superficie, il sommergibile passa dallo stato di galleggiante allo stato di sottomarino eliminando la propria riserva di galleggiabilità. Nella cronaca della tecnologia del naviglio subacqueo si trova che questa eliminazione della riserva superficiale di galleggiabilità fu ottenuta in base a due diversi concetti, che furono:

1°) O di annullare completamente la riserva di galleggiabilità, mettendo il battello in perfetto equilibrio di pesi e di spinte nelle sue condizioni di immersione entro lo strato acqueo immediatamente contiguo al pelo liquido, salvo a determinare poi un ulteriore affondamento mediante l'impiego di appropriati mezzi statici o dinamici;

2°) O di conservare lo scafo immerso nel possesso di una piccola frazione della sua iniziale riserva di galleggiabilità, salvo a distruggere anche questa – che fu chiamata la riserva fissa o la spinta residua – e distruggerla mediante i mezzi dinamici coi quali si ottiene l'ulteriore affondamento e il movimento subacqueo del battello.

Si ebbero così due classi di scafi destinati alla navigazione subacquea secondochè, sommersi interamente nella regione liquida contigua alla superficie dell'aqua, vi si trovano in possesso di una galleggiabilità nulla, o di una galleggiabilità sia pure piccola ma positiva.

L'eliminazione completa o quasi completa della riserva superficiale di galleggiabilità si ottiene con un mezzo assai semplice e comune alle due classi sopra accennate, e cioè si ottiene lasciando penetrare nell'interno dello scafo, e precisamente nei compartimenti di doppio fondo all'uopo predisposti, una zavorra di acqua in quella quantità che è necessaria perchè il peso del sistema aumenti di tanto quanto era l'ammontare della iniziale riserva di galleggiabilità, diminuito del prefisso valore della spinta residua.

L'imbarco della zavorra d'acqua è una operazione che si compie mediante la manovra di apertura di un certo numero di valvole di carena, attraverso le quali l'acqua del mare penetra automaticamente nei rispettivi compartimenti di doppio fondo, cacciandone attraverso appositi tubi di sfogo l'aria ivi preesistente. Poichè l'entrata dell'acqua avviene sotto un carico idrostatico continuamente decrescente e contro resistenze varie incontrate in valvole e tubi e contro la resistenza dell'aria al suo sfogo, la introduzione dell'acqua avviene con una velocità media, piuttosto esigua, circa un metro per secondo. Laonde, quando anche si sia provveduto ad una larga sezione dei tubi di afflusso dell'acqua e di sfogo dell'aria, l'operazione dell'imbarco della zavorra, che è la prima fase dell'operazione d'affondamento, richiede un tempo sensibile, tanto maggiore quanto più grande è la preesistente riserva di galleggiabilità in superficie: nei primi veri e proprii sommergibili esso ascese fino a oltre venti minuti.

Nei sommergibili italiani ideati dal Laurenti fu adottato un provvedimento semplice e ingegnoso mediante il quale, senza diminuire la riserva di galleggiabilità tanto utile al buon svolgimento della navigazione in emersione, fu notevolmente ridotta la quantità d'acqua da introdurre attraverso le valvole di carena. A questo uopo la porzione di scafo soprastante al piano di galleggiamento in emersione fu suddivisa in due parti indipendenti mediante un ponte stagno; la parte superiore fu provvista sui fianchi di portelloni

destinati a esser tenuti chiusi nella navigazione sopracquea e ad essere aperti quando sia dato l'ordine di apparecchiare per la navigazione subacquea. Mediante questo provvedimento la riserva di galleggiabilità da vincere con introduzione di zavorra d'acqua resta ridotta alla sola quota corrispondente al volume compreso fra l'iniziale piano di galleggiamento e il ponte stagno mentre la parte di scafo superiore al ponte stagno, vera e propria opera morta nel senso più classico della parola, sceso che sia il ciglio del ponte stagno al di sotto del pelo liquido, si mette attraverso gli ampi portelloni in libera comunicazione col mare e cessa di dar luogo ad azioni di spinta, come l'acqua, ivi liberamente circolante, non dà luogo ad azioni di peso. E così, mentre permane stabilita nella misura di circa il sessanta per cento la riserva di galleggiabilità relativa alla navigazione in emersione, resta ridotta di gran lunga, e cioè a non più del trenta per cento, quella da vincere agli scopi dell'affondamento con impiego di mezzi esterni e il tempo necessario ad eliminarla mediante introduzione di zavorra d'acqua può essere contenuto nel limite di circa cinque minuti, e anche meno se, giusta un processo di recente introduzione, l'afflusso dell'acqua alle casse di zavorra sia favorito mediante il vuoto.

§ 6. — *Mezzi statici di sommersione.* — I sottomarini ad annullamento totale della riserva di galleggiabilità, o come dicesi a spinta residua nulla, sono ora caduti in disuso, perchè il desiderio di assicurare nel sottomarino una tendenza naturale e permanente a risalire a galla, ha fatto rinunziare volentieri alla maggior economia di propulsione dei sottomarini di questa classe in confronto di quelli a galleggiabilità positiva. Del resto la realizzazione dei sottomarini a galleggiabilità nulla fu proseguita piuttosto in base ad astrazioni teoriche che alla considerazione delle realtà del fenomeno fisico costituito dal battello sottomarino; solo perchè il loro studio ha sedotto molti dei primi tecnici che si sono occupati di scafi per la navigazione subacquea, credo conveniente di soffermarmi brevemente sui sottomarini a galleggiabilità nulla e sugli artifizi imaginati allo scopo di rendere possibile il loro pratico conseguimento.

In un sommergibile a galleggiabilità nulla, di noto peso e di noto volume esterno, il quale noi supponiamo rigorosamente inva-

riabile, inizialmente immerso a fior d'acqua in un liquido calmo di nota densità, si può ottenere che esso assuma un moto verticale di discesa in seno al liquido, sia producendo nel sommergibile un *aumento di peso*, p. es. mediante introduzione di una quantità di zavorra d'acqua, sia determinando in esso una *diminuzione di volume*, p. es. mediante la rientrata di uno stantuffo a tenuta. L'ipotesi concessa dall'idrostatica per la quale l'acqua ambiente viene riguardata come di densità rigorosamente invariabile al crescere della profondità, ci autorizzerebbe a ritenere che, lasciata da banda ogni considerazione di accelerazione e velocità del moto di discesa, un aumento comunque piccolo di peso o una diminuzione comunque piccola di volume, dovrebbero esser capaci di produrre nel sottomarino una discesa illimitata in profondità: e noi potremmo illuderci di poter arrestare il sottomarino a quella determinata profondità, alla quale intenderemmo di conservarlo librato, e ciò col solo ripiego di rimuovere quell'aumento di peso o quella diminuzione di volume non appena quella determinata profondità fosse stata raggiunta nel moto di discesa.

Se invece presupponiamo che la densità dell'acqua sia, sebbene di poco, crescente con la profondità, la nostra mente ricorre subito alla speranza che lo scafo si possa far rimanere librato a una assegnata profondità graduando inizialmente quell'aumento di peso o quella diminuzione di volume in modo che risulti proporzionato alla desiderata profondità di stazionamento secondo il coefficiente di compressibilità proprio del liquido. Per l'acqua dolce e marina, secondo le determinazioni fisiche a cui ha ricorso qualche costruttore di sottomarini, la densità crescerebbe, almeno negli strati di non grande profondità, in ragione di non più che cinque milionesimi per ciascun metro di profondità: onde con un calcolo molto semplice si potrebbe desumere che per uno scafo sottomarino della media grandezza di cento metri cubi, il quale si voglia tener sommerso alla profondità di dieci metri, si dovrebbero produrre delle variazioni di non più che cinque chilogrammi in peso o cinque decimetri cubi in volume per ottenere lo scopo desiderato. Queste variazioni sono troppo piccole rispetto all'intera mole del sommergibile perchè, anche eseguendole con meccanismi d'introduzione e di espulsione, di delicatissima e prontissima manovra, si possa ragionevolmente sperare

di applicarle utilmente contro le azioni parassite e dinamiche non contemplate nel computo, e perchè un piccolo errore nella quantità d'acqua introdotta o nella rientrata dello stantuffo non abbia da portare il sommergibile ad una profondità sensibilmente diversa da quella desiderata.

Ma oltre a ciò il fondamento stesso delle speranze riposte sull'impiego statico di aumenti di peso o di diminuzione di volume è erroneo e illusorio, e lo è tanto nell'ipotesi di invariabilità della densità dell'acqua quanto in quella di un'acqua leggermente compressibile. Le deduzioni fatte in base a questa ipotesi presupponevano che lo scafo del sottomarino fosse assolutamente rigido e il suo volume rigorosamente invariabile nella progressiva discesa; lo scafo, cavo nel suo interno, è per contro eminentemente elastico e per la pressione dell'acqua ambiente è soggetto a contrazioni crescenti con più rapidità che non gli incrementi della densità della acqua. Perciò i processi di affondamento escogitati in base alla possibilità di trarre partito dalle variazioni di densità dell'acqua e di realizzare per il sottomarino immerso la permanenza fra due acque in stato di equilibrio per assoluta eguaglianza fra peso e spinta locale, sono rimasti nel campo delle utopie e non divennero suscettibili di pratica applicazione nella tecnologia del naviglio subacqueo.

Sia pure momentaneamente soddisfatta la condizione di eguaglianza perfetta fra peso e spinta, ossia di equilibrio, a una data profondità; di questo equilibrio non si può nemmeno dire che sia indifferente, esso è necessariamente instabile. E invero un aumento, per quanto lieve, di immersione, dovuto per esempio a una leggerissima infiltrazione o alla componente verticale svolgentesi in seguito alla variazione d'orientamento di un timone, farà aumentare la pressione esterna, e provocherà una diminuzione di volume dello scafo e con questa diminuzione una ulteriore e indefinita discesa dello scafo: se vi saranno, come inevitabilmente vi sono, delle campane d'aria, la grande compressibilità di questa non potrà che precipitare la discesa. E inversamente per una lievissima variazione di forze in senso opposto. Al contrario di quanto succede nell'areostato, il quale può effettivamente trovare un'altezza di equilibrio e conservarla, il sottomarino, abbandonato al solo impiego di mezzi statici di som-

mersione, non può che automaticamente o discendere nell'abisso o risalire ad affiorare il pelo liquido.

Questo fatto mi porge occasione per mettere in rilievo un altro dei tanti aspetti per i quali il naviglio sottomarino differisce dal naviglio galleggiante. Noi architetti navali siamo profondamente imbevuti dell'idea della somma importanza che nei nostri progetti ha l'esatta previsione del peso, e sempre ci tormenta la preoccupazione dell'eventualità di un difetto di previsione, ben sapendo che esso sarebbe scontato dalla nave con un sacrifizio di velocità, di portata, di economia dell'esercizio, di potenza militare o di capacità rimuneratrice. Ma in fin dei conti al nostro errore di previsione del peso vi è automatico rimedio nella maggior pescagione che il bastimento assume e questo, se anche un pò diverso da quello che noi avevamo concepito e voluto, non cessa per ciò di sussistere e, generalmente, di poter servire. Invece nel naviglio sottomarino un difetto di esattezza nella previsione del peso totale, se eccede il lieve limite di tolleranza che può esser offerto dalla capacità della cassa di compensazione dei pesi variabili, trascinerebbe inevitabilmente, e non in senso figurato, lo scafo nell'abisso e ne annullerebbe l'esistenza utile.

§ 7. — *Mezzi dinamici di sommersione.* — Per lo scopo della conservazione di una data profondità di immersione fu nella tecnologia dei sottomarini sostituito all'impiego di mezzi statici l'impiego di mezzi d'asservimento, mediante i quali, introdotta nel sottomarino immerso a fior d'acqua una quantità di zavorra d'acqua arbitrariamente scelta e limitata dalla condizione di non determinare un troppo rapido moto di discesa, il sommergibile fosse automaticamente ricondotto verso la regione di profondità prefissa, tosto che la avesse valicata o, per una causa qualsiasi, se ne fosse allontanato verso il basso o verso l'alto. Questi mezzi possono essere costituiti da un congegno d'introduzione e d'espulsione d'acqua, in una parola da una pompa, comandato da un apparecchio d'asservimento previamente regolato sulla prefissa profondità. Di questi apparecchi d'asservimento la cronaca del naviglio sottomarino offre due tipi principali, quelli a manometro e quelli a piatto idrostatico, che del resto non differiscono sostanzialmente fra loro nel concetto. Nell'apparecchio d'asservimento a manometro, la lancetta di un manometro metallico comunicante con

'acqua ambiente può oscillare fra due tacche comprendenti fra loro la graduazione corrispondente alla prefissa profondità d'acqua, e mediante un sistema elettromagnetico è connessa ad una pompa in guisa che questa rimanga inattiva fin che la lancetta non tocca alcuna delle due tacche e agisca in senso di espellere o introdurre acqua tosto che la lancetta venga a toccare l'una o l'altra delle tacche in conseguenza del trovarsi lo scafo sotto o sopra la prefissa regione di profondità, e così ricondurvelo. L'apparecchio di asservimento a piatto idrostatico, nel suo concetto, consiste in uno stantuffo ossia piatto mobile a tenuta d'acqua entro un astuccio applicato allo scafo: la faccia esterna dello stantuffo è esposta alla pressione dell'acqua ambiente, la interna sopporta la tensione di una molla registrabile a volontà. Mediante un congegno cinematico gli eventuali movimenti lineari dello stantuffo, dovuti alla prevalenza della pressione dell'acqua sulla tensione della molla, sono trasformati in movimenti della valvola di ammissione del fluido motore al motorino di una pompa di zavorra. La tensione della molla sia previamente registrata in modo da far equilibrio allo sforzo esercitato sul piatto idrostatico da una colonna d'acqua di assegnata profondità e la corrispondente posizione della valvola sia tale da lasciar ferma la pompa di zavorra. Non appena una causa esterna qualsiasi faccia variare la profondità d'immersione al di sopra o al di sotto di quella assegnata, il piatto, spinto o dall'eccesso della reazione della molla o dall'eccesso della pressione dell'acqua, subirà uno spostamento lineare che dal congegno cinematico di trasmissione sarà tosto trasformato in movimento della pompa di zavorra producendo nel sottomarino una variazione di peso di effetto inverso a quello inizialmente prodotto dalla causa esterna che si trattava di combattere, e riconducendo perciò lo scafo verso il piano della profondità primitiva e prefissa, o meglio facendogli continuamente compiere delle escursioni sopra e sotto di esso.

Durante un certo periodo di tempo i sottomarini furono effettivamente provvisti di questi o di analoghi apparecchi d'asservimento tendenti a far ritornare costantemente lo scafo verso una data profondità e a determinare in esso la proprietà che chiamasi della stabilità di immersione. Dai tecnici veniva allora asserito che, salve le esigenze dell' inerzia e della continua alternazione dei periodi

di avviamento della pompa ora in introduzione ora in espulsione, essi erano di effetto abbastanza rapido e sicuro. Ma in seguito l'impiego di questi mezzi - i quali ebbero applicazione anche nei sottomarini a galleggiabilità positiva - fu abbandonato e l'abbandono fu, a quanto credo, suggerito dal fatto che l'alterna introduzione ed espulsione d'acqua in una cassa posta nella regione centrale dello scafo può bensì servire a regolare la immersione di uno scafo sommerso tanto se sia fermo come se sia dotato di moto di avanzamento, ma non ha efficacia alcuna nel combattere le azioni di inclinazione longitudinale che per l'effetto combinato della spinta di propulsione e della resistenza al moto di carena si sviluppano nel sottomarino in movimento. La conservazione della quasi orizzontalità dell'assetto longitudinale nel moto di avanzamento è nella manovra dei sottomarini altrettanto importante che la conservazione della profondità di immersione; per conseguirla e assicurarla furono stabilite delle casse d'estremità e dei mezzi d'asservimento a pendolo analoghi a quelli sopra descritti e disposti in guisa che una deviazione dello scafo dalla prefissa condizione di assetto dovesse automaticamente mettere in azione una pompa e farle trasferire dall'una all'altra cassa d'estremità tanta quantità di acqua quanta ne occorresse per combattere e annullare quella deviazione. Ma la successiva introduzione di altri mezzi, coi quali si ottengono a un tempo la conservazione della profondità di immersione e della orizzontalità longitudinale dello scafo contro le cause che le abbiano perturbate, fecero cadere in disuso i mezzi di asservimento.

E qui devo notare che, se mi sono alquanto diffuso intorno a questi ultimi punti, ciò non è perchè essi abbiano importanza nella tecnologia attuale del naviglio subacqueo, ma perchè la possibilità di mantenere lo scafo a una data profondità col solo impiego di mezzi statici e quella di limitarne le escursioni entro una zona di poca altezza con l'impiego di mezzi d'asservimento, come hanno sedotto molti dei passati ideatori di sottomarini, così continuano a sedurre molti di coloro che per la prima volta rivolgono la loro attenzione a questa specie di naviglio. Ed è importante che circa la pratica possibilità del sottomarino staticamente librato a una data profondità la loro mente venga liberata da illusioni, che sono alimentate dal preconcetto di una possibile imitazione della vescica

natatoria dei pesci, dalla reminiscenza di qualche esperimento di fisica elementare e dal confronto col comportamento degli areostati.

§ 8. — *Possibilità di ottenere la sommersione con grande riserva di galleggiabilità.* — Al sottomarino caratterizzato da perfetta eguaglianza fra il peso e la spinta dovuta all'acqua che esso disloca (e, peggio, a quei pochi che forono ideati con l'intendimento di farli navigare sott'acqua con un leggero eccesso di peso), si muove il rimprovero di capitale importanza che in essi, ove venga a mancare anche per breve tempo il funzionamento automatico del meccanismo d'asservimento e il modo di manovrare in senso inverso gli apparecchi coi quali si è ottenuta la sommersione, lo scafo non avrebbe da sè alcuna tendenza a risalire a galla ma anzi (salvo il ripiego estremo dell'abbandono della zavorra di sicurezza) dovrebbe discendere sino a toccare il fondo. Per questo grave difetto il sistema di sommersione a galleggiabilità nulla fu abbandonato e i nuovi scafi subacquei appartengono tutti al tipo di quelli che, qualunque sia la profondità alla quale devono stazionare e muoversi fra due acque, vi posseggono un eccesso della spinta sul peso, vi posseggono una galleggiabilità positiva, e sono condotti e mantenuti alla desiderata profondità d'immersione mediante la creazione, con mezzi dinamici, di una forza esterna che contrasta la galleggiabilità o spinta residua. La esperienza ha ormai fatto accertare come non sia necessario che la spinta residua deva essere molto forte per adempiere bene al suo ufficio essenziale: pare sufficiente commisurarla a pochi - da due a tre - millesimi del peso del sottomarino in completo assetto, di guisa che ad un sottomarino del dislocamento di circa duecento tonnellate compete prossimamente una spinta residua di non oltre cinquecento chilogrammi. Nulla impedirebbe di attribuire al sottomarino sommerso una quota di spinta residua anche maggiore, ma questa maggior quota non potrebbe essere combattuta e vinta se non che con una erogazione di energia fatta a scapito dell'energia altrimenti erogabile nella propulsione, e cioè la maggior quota di riserva di spinta andrebbe a scapito della velocità. Allo stato presente della tecnologia dei motori impiegabili nei sottomarini la energia da spendere nella propulsione subacquea risulta troppo cara per poter pensare a dispendere l'energia immagazzinata a bordo in altri

scopi che non siano quelli immediati della propulsione e della manovra; ma vi è già chi antivede un tempo nel quale, resa meno costosa l'energia stessa, si potrà destinarne una parte assai maggiore che non ora a vincere la maggior quota di resistenza al moto che nasce da una maggior quota di riserva di spinta: allora si potrà costruire un naviglio subacqueo provvisto di un valore della riserva di spinta tale da rendere la navigazione subacquea quasi altrettanto sicura che quella in superficie e consentire impunemente, come già negli ordinarii bastimenti, l'allagamento di uno o più compartimenti dello scafo.

§ 9. — *Fasi dell'operazione di sommersione.* — Contenuta come ora è negli indicati limiti di due o tre millesimi del dislocamento, o, se vuolsi, contenuta nei limiti di poche centinaia di chilogrammi, la riserva di spinta non ha certamente alcuna efficacia contro le grandi irruzioni d'acqua, al più ne ha qualcuna contro le piccole infiltrazioni e praticamente il grado della sua efficacia risulta lo stesso o ben poco differente nel passare dai piccoli ai grandi sottomarini, i quali presentano in questo un altro punto di differenza rispetto agli ordinari bastimenti galleggianti. Tuttavia, contenuta nei modestissimi limiti indicati, essa riesce sufficiente per conservar nel battello, anche in caso di lievi infiltrazioni di acqua, una tendenza automatica verso il ritorno in superficie al venir meno della forza esterna con la quale si è prodotta e mantenuta la sommersione; nello stesso tempo essa resta abbastanza piccola per non dar luogo a troppo grave sacrificio di energia di propulsione e infine riesce così esigua di fronte alla massa del sommergibile e alle resistenze del mezzo acqueo, che la velocità ascensionale che da essa può conseguire non disturba le altre manovre.

Quindi, secondo l'uso generale dei nostri giorni, il procedimento mediante il quale si conferisce a uno scafo sommergibile, inizialmente gallegiante, la proprietà di scendere a una data profondità, comprende due stadii; in un primo stadio della durata di circa cinque minuti, si lasciano riempire a rifiuto, mercè il carico naturale del livello liquido, i compartimenti del doppio fondo destinati a ricevere la zavorra di acqua, e in una cassa di compensazione dei pesi variabili da una sommersione all'altra si introduce tanta acqua quanta

ne occorre perchè dello scafo a fior d'acqua rimanga emersa soltanto una piccola parte (generalmente una torretta contenente portelli a vetri fissi per l'ordinaria visione), parte di volume corrispondente alla prefissa misura de la spinta residua. In un secondo stadio, talora brevissimo e talora prolungato da cause parassite non ben definite, si ottiene l'ulteriore scomparsa del battello, alla quale fa indi seguito il suo trasporto alla prestabilita profondità: ma queste operazioni della scomparsa sott'acqua e del trasporto in profondità si compiono unicamente con l'impiego di mezzi meccanici, i quali possono far capo o ad eliche con asse verticale o a timoni con asse orizzontale.

§ 10. — *Eliche orizzontali di affondamento.* — Le eliche orizzontali, dette anche eliche di affondamento per distinguerle dalle eliche verticali di propulsione con le quali si ottiene il moto progressivo orizzontale dello scafo e dalle eliche verticali di evoluzione, in qualche raro caso usate per favorire le qualità giratorie, sono per lo più in numero di due, giranti in senso opposto affine di non dar luogo sullo scafo a un movimento permanente di girazione in piano orizzontale; sono collocate una nel corpo di prua e l'altra nel corpo di poppa o entrambe nel piano diametrale o, per minor disturbo di altre manovre, sfalsate diagonalmente rispetto a questo; talvolta sporgono dal dorso dello scafo, tal altra sono contenute entro tubi verticali traversanti lo scafo dal basso all'alto. Sono indipendenti nel loro movimento che è, si intende, determinato da quella qualsiasi sorgente di energia che per gli scopi della propulsione dell'illuminazione e di ogni altra manovra si trova stabilita nell'interno dello scafo. Nello stesso modo che le eliche di propulsione generano, quando sono in moto, una spinta orizzontale che viene spesa nel vincere la resistenza al moto orizzontale dello scafo, così le eliche di affondamento messe in rotazione generano una spinta verticale diretta dall'alto verso il basso, la quale può andar spesa nel vincere tutte le forze che si oppongono alla discesa del sottomarino e che sono costituite dalla riserva fissa di galleggiabilità di questo e dal complesso delle componenti verticali delle resistenze che il mezzo oppone nel moto subacqueo del sottomarino. Poste in moto a velocità rotatoria convenientemente elevata servono a far disparire il battello sott'acqua e a farlo scendere verso

una regione di profondità prefissa, raggiunta la quale una giudiziosa moderazione della velocità di rotazione potrà far sì che esse generino per l'appunto la spinta occorrente ad annullare ogni altra azione verticale operante sullo scafo, il quale così, salvo che intervengano elementi di perturbazione, non avrà motivo di scostarsi da quella regione di profondità, tanto se si trovi dotato di moto progressivo orizzontale quanto se ne sia privo.

Le eliche di affondamento, che nei sommergibili corrispondono alle eliche di sostentamento degli elicopteri negli apparecchi d'aviazione, sono pregevoli in quanto dànno modo di ottenere una rapida scomparsa sott'acqua, di affondare così obliquamente in moto come verticalmente sul posto, di rimanere sommersi e fermi in agguato in un certo luogo conservando sempre il possesso della galleggiabilità positiva; messe ad andatura diversa dall'una all'altra costituiscono un mezzo per la conservazione dell'orizzontalità dell'assetto contro le perturbazioni di questa. Ma hanno pure degli inconvenienti: la loro andatura, tanto se venga governata a mano come se venga congiunta ad apparecchi automatici di asservimento, non è suscettibile di una regolazione sufficientemente rapida e precisa; esse introducono a bordo maggiore complicazione di ingombro, di pesi, di meccanismi; col gorgoglio e coi getti d'acqua che determinano in superficie rivelano facilmente la presenza del sottomarino in agguato; aumentano considerevolmente la resistenza dello scafo alla propulsione orizzontale; il loro stesso funzionamento richiede notevole assorbimento di energia motrice e la efficienza delle stesse, se adoperate sullo scafo in movimento, riesce singolarmente bassa, tanto che pare assai difficile ottenere da un'elica d'affondamento la generazione di una spinta superiore ai duecento chilogrammi. In quasi tutti i sommergibili moderni si è rinunziato al loro impiego.

§ 11. — *Timoni orizzontali.* — I timoni orizzontali, detti anche timoni di profondità come quelli dei dirigibili e degli aeroplani coi quali hanno comune la funzione, possono essere applicati ad ottenere che un sommergibile ci porti ad una data profondità e la conservi in virtù delle reazioni che l'acqua oppone contro le lamine sporgenti da un corpo in moto progressivo, quando queste lamine siano inclinate sulla direzione del moto. È una caratteristica essenziale dell'uso dei

timoni di affondamento quella che l'affondamento non può avvenire sul sommergibile fermo nè il trasferimento da una profondità ad un'altra può farsi verticalmente sul posto; entrambe queste operazioni non possono eseguirsi se il macchinario di propulsione non sia in moto e se lo scafo non abbia libera davanti a sè una regione acquea convenientemente estesa. I timoni orizzontali di profondità, ben distinti dagli ordinarii timoni verticali di direzione, sono sempre stati largamente usati nel naviglio subacqueo ed ora vi hanno impiego quasi esclusivo; la loro applicazione si presenta con molta varietà nel numero e nella posizione dei timoni; talvolta vi è un solo timone a una sola estremità dello scafo, tal altra si presentano a coppie simmetricamente sui due fianchi del battello; talora le coppie sono disposte nel solo corpo prodiero o nella sola regione centrale o nel solo corpo poppiero dello scafo; più comunemente vi è una coppia a prua e una a poppa, qualche volta una al centro, qualche altra volta a prua o a poppa vi è più di una coppia di timoni di profondità. Questi, che sono generalmente abbattibili lungo i fianchi affinchè non disturbino la navigazione in superficie, fanno impressione sull'osservatore non soltanto per la loro molteplicità ma anche per la loro estensione assoluta, sopra tutto se questa venga comparata con quella dei timoni di direzione negli ordinari bastimenti. Nel naviglio ordinario sarà raro trovare una superficie di governo orizzontale eccedente i due centesimi dell'area del piano di deriva, nei sommergibili si riscontra una superficie complessiva degli organi di governo verticale che talvolta arriva ai cinque centesimi dell'area della proiezione orizzontale dello scafo. Certamente questa forte eccedenza è determinata dalla necessità di aver assicurato il governo verticale anche alla minima velocità di moto subacqueo.

Una dimostrazione assai limpida dell'azione impulsiva che i timoni di profondità sono capaci di esercitare su uno scafo sommerso, mobile di moto progressivo orizzontale, si potrebbe ottenere dalla semplice ispezione di figure schematiche rappresentanti le forze che nel piano verticale longitudinale sono determinate sullo scafo dalle reazioni sviluppantesi sui timoni obliquati rispetto alla direzione del moto orizzontale e dal trasporto di queste reazioni a un presupposto asse di istantanea rotazione. Sarebbero figure analoghe a quelle che si trovano riportate in ogni corso di manovra navale

per dare un'idea dell'azione impulsiva di un ordinario timone nella girata del bastimento in piano orizzontale.

Ciascun timone (o meglio ciascuna coppia di timoni d'estremità) può essere impiegato o isolatamente o congiuntamente con quello dell'altra estremità. L'impiego isolato di un timone d'estremità dà luogo ad una forza di deriva nel piano verticale e ad una coppia di inclinazione longitudinale, in conseguenza della quale un sottomarino in moto si tuffa longitudinalmente nello stesso modo che una nave in moto gira orizzontalmente sotto l'azione di un timone sbandato; in astratto il tuffo della prua potrebbe ottenersi tanto con un timone di poppa quanto con un timone di prua, purchè sia scelto convenientemente il loro orientamento; la pratica dimostra che con le forme ordinariamente adottate per gli scafi subacquei il timone di poppa dà luogo alla formazione di un asse di istantanea rotazione sensibilmente spostato verso prua, il che, se giova ad accelerare l'inclinazione ha l'inconveniente di dar luogo a svolgimento di grandi sforzi d'inerzia, sì che riesce difficile arrestare l'ulteriore inclinazione del bastimento dopo che esso ha incominciato a tuffarsi e, spostandosi nel piano verticale, è giunto alla profondità desiderata. Inversamente un timone di prua dà luogo ad un asse di istantanea rotazione ancora giacente verso prua ma meno eccentrico del precedente e perciò a una coppia di inclinazione che, se ha il vantaggio di determinare piccole forze di energia, è anche poco efficace nel produrre il tuffo e il trasporto verticale, nè a compensare questa minore efficacia della coppia d'inclinazione vale il fatto che la forza verticale di deriva sia nel caso del timone prodiero contraria alla riserva di spinta mentre le era concomitante nel caso del timone poppiero. L'esperienza ha dimostrato che all'impiego isolato dei timoni d'estremità sono correlativi varii gravi inconvenienti, inclinazioni anormali, subitanei sprofondamenti e non voluti ritorni in superficie, necessità di somma abilità e di molta tensione mentale nell'uomo destinato alla loro manovra. Perciò i moderni sommergibili sono generalmente provvisti di timone, o di coppie di timoni, di profondità a entrambi gli estremi.

La manovra congiunta dei timoni alle due estremità può essere eseguita in due modi, cioè tenendoli orientati o in contrasto o all'unisono, secondo che i piani delle lamine formanti timone sono messi

in posizione simmetrica rispetto a una sezione trasversale o semplicemente in posizione parallela. I due diversi modi di impiego congiunto dei timoni rispondono a due concetti meccanici differenti; nell'impiego dei timoni in contrasto vi è quasi completa eliminazione delle opposte componenti verticali delle reazioni dell'acqua, le quali reazioni operano così sullo scafo mediante una coppia di gran braccio e perciò capace di dar luogo a una pronta inclinazione e a molta rapidità di tuffo con la prua, e tuttavia non capace di determinare una ingente intensità di forza di inerzia essendo l'asse di istantanea rotazione necessariamente compreso fra i due timoni e cioè nella regione centrale dello scafo. Donde segue che nella manovra di affondamento con impiego di timoni a contrasto, il sottomarino, mentre non perde in rapidità di tuffo, vi si conserva più docile e meno affaticante che non nella manovra con un solo timone poppiero. Usati all'unisono i due timoni d'estremità non dànno luogo a intervento di coppie, nè quindi di inclinazioni dello scafo, ma soltanto di una forza verticale di deriva diretta all'ingiù, la quale, ove superi l'intensità della riserva di spinta e della resistenza del mezzo, dovrà far sì che il sottomarino discenda obliquamente mantenendosi sempre parallelo a sè stesso. Si ritiene da alcuni competenti che il sistema di sommersione per tuffo con timoni a contrasto sia il migliore per ottenere la prima sparizione sott'acqua e che l'impiego dei timoni all'unisono sia il più indicato per l'ulteriore discesa e navigazione subacquea, come quello che offre la maggiore sicurezza di navigazione e per il quale il sottomarino si conserva docile anche in mano a un timoniere di mediocre abilità e senza procurargli grave fatica.

Con questi cenni ho inteso di dar un'idea del primo, impulsivo effetto dell'obliquamento di uno e più timoni di profondità in un sottomarino progrediente di moto orizzontale; per essere completo avrei dovuto ricordare che agli effetti accennati si aggiunge quello di una diminuzione della velocità del moto di progressione in conseguenza delle componenti orizzontali delle reazioni opposte dall'acqua contro le lamine dei timoni. Trascorsi alcuni istanti dall'obliquamento dei timoni e prodottosi sullo scafo un cambiamento nel regime della resistenza incontrata dallo scafo nel mezzo acqueo, l'interpretazione degli effetti del mantenimento dei timoni

in istato di obliquita non potrebbe essere tanto semplice: tuttavia si capisce che l'effetto di una continuata e costante obliquità dei timoni sarebbe quello di far descrivere al sottomarino nel piano verticale una curva di discesa analoga alla curva di evoluzione descritta in piano orizzontale dal bastimento galleggiante. Ma mentre a questo, e in particolare alla nave da guerra nella sua manovra di squadra, può interessare di percorrere gran parte, se non il completo giro, della sua curva di evoluzione rimanendo su essa anche per un tempo relativamente lungo e cioè per diecine di minuti, al sottomarino – il quale del resto non potrebbe permettersi di assumere delle inclinazioni longitudinali anormali – interessa di rimanere sulla sua traiettoria di discesa soltanto per quel piccolo tratto e per quel breve tempo che gli occorre per giungere alla regione di profondità alla quale esso si prefigge di navigare in rotta orizzontale. Raggiunta questa profondità, e anzi in pratica prima assai di raggiungerla, esso dovrà moderare l'obliquità dei suoi timoni se questi operavano in parallelo, prima moderarla e poi rovesciarla se questi operavano in contrasto o se era in azione un solo timone d'estremità e cercar di raggiungere una condizione di cose per la quale, avuto riguardo a tutte le forze su esso agenti, esso si trovi ine quilibrio di forze nella sua rotta orizzontale a quella profondità.

§ 12. — *Forze agenti sul sottomarino immerso e in moto: stabilità di rotta.* — Sono forze agenti sul sottomarino in moto orizzontale a una qualsiasi profondità il peso applicato nel centro di gravità del sistema, la spinta di carena applicata nel centro di volume dello scafo interamente sommerso con intensità eccedente quella del peso per l'ammontare della riserva fissa di galleggiabilità, la spinta di propulsione generata dall'elica o dal sistema delle eliche propulsive, il complesso della resistenza del mezzo contro lo scafo sommerso e le sue varie appendici, le reazioni dell'acqua contro i timoni di profondità obliquati ed eventualmente contro i timoni di direzione deviati dal piano di simmetria. Si comprende come per ogni regime di andatura delle macchine motrici, e cioè di velocità del sottomarino, debba esistere un assetto dello scafo e un orientamento dei timoni di profondità tale che il complesso sistema delle forze di peso, di spinta, di propulsione, di resistenza e di governo si riduca a un

sistema di forze in equilibrio, sotto l'azione del quale il sottomarino debba muoversi di moto rettilineo uniforme. Perchè il sottomarino possa essere utilmente impiegato, occorre che l'assetto longitudinale che esso assume nella navigazione subacquea sia orizzontale o poco differente dall'orizzontale e occorre pure che in questo assetto esso percorra una traiettoria orizzontale, chè altrimenti esso finirebbe o con rivenire alla superficie o con scendere obliquamente verso il fondo. Ora al sottomarino la facoltà di conservare simultaneamento la quasi orizzontalità dell'assetto e l'assoluta orizzontalità della traiettoria è conferita appunto mediante giudiziose disposizioni di prima costruzione e mediante una sagace e abile manovra dei timoni da parte del timoniere, il quale per ogni regime di andatura delle macchine, per ogni regìme di disposizione dei pesi nell'interno dello scafo e per ogni regime di valore della riserva fissa di spinta deve saper trovare quell'angolo di orientamento del timone o dei timoni al quale corrispondono le desidesate condizioni di orizzontalità dell'assetto e della traiettoria. Ma non è da credere che una volta realizzate queste orizzontalità per le condizioni dello scafo in una data sommersione, queste vi permangano per tutta la durata della sommersione stessa; la orizzontalità dell'assetto e della traiettoria è continuamente insidiata da molteplici azioni esterne parassite, dalle irregolarità del moto delle motrici, dagli eventuali spostamenti di persone all'interno dello scafo, dalle variazioni della riserva di spinta dovuta alle infiltrazioni, dall'agitazione dell'acqua ambiente, dalle correnti subacquee e sopra tutto dall'intervento delle componenti verticali delle reazioni dell'acqua ambiente contro i timoni verticali di direzione, i quali, nel sottomarino come nel bastimento galleggiante, sono soggetti a frequentissime, sebbene piccole, mutazioni d'orientamento fatte allo scopo di mantenere una data direzione del moto, o peggio, sono soggetti a essere manovrati allo scopo di produrre cambiamenti di direzione del moto. Tutte queste ed altre cause tendono continuamente a distruggere l'equilibrio delle forze con le quali il timoniere aveva per un istante realizzata l'orizzontalità dell'assetto e della traiettoria, onde egli con nuova manovra dei timoni deve essere costantemente vigile a ricostruire tale equilibrio. In un certo senso può dirsi che la manovra di governo di un sottomarino rassomiglia a quella di un funambolo, o anche di un ciclista, che si sforza continuamente di

mantenere una condizione di equilibrio che continuamente tende a sfuggirgli. Perchè la ricostruzione dell'equilibrio riesca praticamente conseguibile occorre che il sottomarino possegga in sè e per sè la proprietà della stabilità di rotta orizzontale cioè la proprietà per la quale, deviato leggermente dal suo assetto orizzontale di regime, vi si trova per ciò stesso soggetto a una nuova distribuzione di resistenze di carena che tende a ricondurre lo scafo verso l'assetto primitivo, distruggendo così il disturbo intervenuto. Si potrebbe far vedere che per conseguire questa proprietà è intanto necessario che la risultante delle azioni di resistenza della carena sommersa incontri la linea di azione delle forze propulsive alquanto a poppavia del mezzo dello scafo; per assicurare in alto grado il possesso della stabilità di rotta orizzontale, che è proprietà apprezzatissima, ogni marina militare, ogni costruttore di sottomarini ricorre a espedienti che in generale non vengono resi pubblici. L'esperienza avrebbe mostrato che a procurare la conservazione della rotta orizzotale senza soverchia fatica del timoniere giova assegnare una propria funzione specifica a ciascuno dei timoni orizzontali d'estremità, impiegare quello di poppa come mezzo per conseguire una prima volta la orizzontalità della rotta in data profondità d'acqua e, lasciato fermo questo nell'orientamento che fu trovato buono in relazione al sistema generale delle grandi forze operanti sullo scafo a quel regime, eseguire col solo timone di prua la correzione continua delle minori azioni esterne che quel sistema tendono a perturbare.

§ 13. — *La rotta orizzontale.* — Ho esposto sommariamente quali sono i criterii che regolano nei sottomarini l'impiego dei timoni orizzontali, considerati prima come mezzo per ottenere la discesa, indi come mezzo per conseguire e mantenere la orizzontalità dell'assetto e della traiettoria, nella quale ultima funzione i timoni principali di profondità possono essere secondati da timoncini ausiliari. Ma è bene mettere in rilievo che, quando nella navigazione subacquea si parla di rotta orizzontale, non si intende di pretendere il conseguimento di una traiettoria matematicamente rettilinea e orizzontale ma piuttosto la realizzazione di una traiettoria la quale si avvicini abbastanza bene al concetto astratto della rotta rettilinea orizzontale. Sotto l'influenza delle cause perturbatrici esterne e in particolare sotto l' influenza delle com-

ponenti verticali delle reazioni dell'acqua sui timoni di direzione le quali, subito che siano entrate in giuoco, vengono combattute per mezzo di contrarie componenti verticali generate mediante la manovra dei timoni di profondità, il sottomarino si trova soggetto a continue alternanze di forze verticali in su e in giù, le quali sul sottomarino, se fosse fermo, determinerebbero una oscillazione di affanno sopra luogo e sullo stesso, se è in moto d'avanzamento, devono tradursi in una traiettoria sinuosa tanto più allungata e a pendìo tanto meno sentito quanto maggiore è il rapporto della velocità del moto d'avanzamento a quella, sempre piccola, del moto verticale di oscillazione. Nella pratica si trova che, anche in mare perfettamente calmo, il centro di figura dello scafo sommerso percorre come traiettoria una curva paragonabile ad una sinusoide allungatissima nella quale gli scarti totali fra la cresta e le gole possono essere mantenuti entro i confini di mezzo metro anche su percorso di più miglia. Appositi manometri registratori indicano in modo continuo l'intensità di questi scarti e nei moderni sommergibili sovente accade che i diagrammi da essi tracciati, testimoni a un tempo e del felice proporzionamento degli organi di governo e della abilità e attenzione del timoniere che tiene imbrigliato il battello, provano che le deviazioni alterne dal piano della profondità media prestabilita non sono state superiori ai dieci centimetri. Evidentemente questa sinuosità della rotta è così piccola da poter riuscire compatibile con tutti gli scopi che un sottomarino può prefiggersi e da potersi praticamente confondere con l'orizzontalità.

§ 14. — *La sommersione del sottomarino non dotato di moto di avanzamento.* — Ho detto che è da tener ben presente che perchè i timoni di profondità possano svolgere sul sottomarino una qualsiasi efficacia, occorre che questo sia in moto; quando si vuole che a una certa profondità questo, anzichè navigare rimanga stazianario, i timoni diventano inerti e inutili e all'opera di essi occorre sostituire quella di un qualche altro mezzo idoneo a contrastare la riserva fissa di spinta. Già ho chiaramente esposto come e perchè sarebbe vano riporre qualche speranza in un annullamento statico della spinta residua; onde, se non si abbia a disposizione un sistema di eliche di affondamento, la stazionarietà del sottomarino in una regione di

data profondità non può essere ottenuta altrimenti che col mezzo dinamico dei colpi idraulici, cioè mediante alterne introduzioni ed espulsioni di acqua in una apposita cassa di regolazione, compiute in modo che il sottomarino compia oscillazioni lineari di moderata ampiezza intorno al piano della profondità prestabilita. Questo dei colpi idraulici è evidentemente un residuo dei primitivi mezzi che furono posti in opera per ottenere la stabilità d'immersione, ma ne differisce notevolmente nella pratica applicazione: in luogo della introduzione o espulsione dei cinque o dei dieci, insomma dei pochi chilogrammi d'acqua cautamente dosati con meccanismi, sia diretti sia d'asservimento, che volevano aver l'aria di essere apparecchi di precisione, oggidì l'operazione si compie agendo sopra due o trecento chilogrammi d'acqua alla volta e la manovra delle pompe che li mettono in giuoco è comandata soltanto a mano. Un abile operatore riesce così a mantenere un sottomarino fisso sulla sua verticale anche per una mezz'ora senza che vi compia in alto o in basso scarti superiori ai venti centimetri.

In ogni modo l'eventualità del bisogno di rimanere stazionarii fra due acque non è frequente nel servizio dei sottomarini: è invece più frequente quella di dover restare per lungo tempo in posizione di agguato con lo scafo adagiato su un basso fondo e, naturalmente, con gli organi di visione indiretta fuori acqua. Questa posizione si consegue, come è ovvio, non soltanto annullando ogni spinta residua ma anzi conferendo al sottomarino, mediante introduzione di acqua un leggero eccesso di peso che valga a rendere stabile la sua posizione di adagiamento sul fondo.

§ 15. — *Timoni verticali o di direzione: loro effetti.* — Nel sottomarino, come in ogni altro veicolo destinato alla locomozione entro un mezzo resistente, si trovano sistemati dei timoni verticali ossia timoni di direzione o di via: sono sistemati alle estremità dello scafo, più comunemente all'estremità di poppa, talvolta a entrambe. Non si manifestano identicamente nello stesso modo gli stessi effetti che un timone verticale produce su un sottomarino e su un galleggiante.

Un timone verticale poppiero, sistemato in basso, quando venga messo alla banda introduce una forza normale al suo asse e avente per effetto di produrre nel piano orizzontale una coppia di accostata

verso il lato verso il quale è messo il timone, e una forza di deriva verso il lato esterno all'accostata. Appena la curvatura della traiettoria di evoluzione nel piano orizzontale si è accentuata, si sviluppano sul sottomarino delle forze d'inerzia applicate al centro di gravità del sistema, le quali aumentano la deriva orizzontale e provocano delle opposte forze di resistenza nel mezzo ambiente: e se queste forze di resistenza hanno, come generalmente, la loro risultante giacente in un piano orizzontale posto più in basso o più in alto del centro di gravità il sottomarino, sotto l'azione simultanea della coppia nascente dalle forze d'inerzia e di deriva e dalle contrarie forze di resistenza e della coppia di stabilità statica dovuta alla sua distribuzione verticale di spinte e pesi, prende uno sbandamento trasversale. Fin qui nulla di sostanzialmente diverso fra il modo di comportarsi di un galleggiante e di un sottomarino sotto l'azione di un timone verticale; senonchè, prodottosi uno sbandamento dell'intero scafo, il timone poppiero, trovandosi nella condizione di una lamina piana che si muove sotto una certa incidenza sulla sua traiettoria, dà luogo anche a una componente verticale che tende a far sollevare o abbassare la poppa; nel galleggiante questo effetto di sollevamento o abbassamento è contrastato dalla forte vigoria della stabilità longitudinale e perciò rimane di piccolissima intensità e sfugge all'osservazione; nel sottomarino, dove la stabilità longitudinale non è grande, distrugge lo assetto longitudinale preesistente dello scafo e turba l'equilibrio delle forze in virtù del quale il sottomarino era trattenuto su una rotta orizzontale. Donde il noto fatto che ad ogni sensibile movimento di accostata corrisponde una perdita della orizzontalità della rotta, e generalmente, una tendenza all'emersione. E poichè la conservazione della orizzontalità della via è quanto di meglio si possa e si deva desiderare nel servizio dei sottomarini, i costruttori procurano di eliminare la tendenza agli sbandamenti nelle accostate, sia tentando con appendici di carena di influire sulle forme dello scafo in modo che presumibilmente le resistenze alla deriva cadano sullo stesso piano orizzontale contenente il centro di gravità del sistema, sia frazionando il timone verticale in una parte sottostante alla carena e in una soprastante al dorso dello scafo, regolando il funzionamento in modo che ne risulti, almeno per una determinata velocità, una probabile compensazione di effetti inclinanti.

§ 16. — *La stabilità statica del sottomarino immerso.* — Si trova scritto e ripetuto con una certa frequenza che il sottomarino è sprovvisto di quella importantissima proprietà che negli ordinari natanti va sotto il nome di stabilità statica e in virtù della quale un bastimento si oppone alle azioni esterne che tendono a inclinarlo deviandolo da una preesistente posizione di equilibrio stabile. Non è che il sottomarino non possegga stabilità statica, soltanto la possiede in maniera e in misura diversa dal galleggiante e perciò una medesima operazione si manifesta nei due tipi con differenza di effetto. Nel galleggiante uno spostamento di peso in una data direzione orrizzontale produce una inclinazione dello scafo attorno ad un asse avente direzione coniugata di quella dello spostamento in una certa ellisse caratteristica delle forme dello scafo e della sua figura di galleggiamento e della condizione di carico del bastimento; inoltre l'intensità angolare della inclinazione del galleggiante attorno a quell'asse dipende dall'orientamento dell'asse stesso, e ne dipende in modo tanto sentito che, secondo che lo spostamento avvenga nel piano trasversale o nel piano longitudinale, i corrispondenti valori angolari delle inclinazioni assunte stanno fra loro nella generalità dei bastimenti, almeno come cento a uno. Ma nel sottomarino sommerso non esiste figura di galleggiamento e con lo sparire di questa spariscono altresì gli elementi che da essa dipendono nello studio della stabilità statica degli ordinarii galleggianti; in esso uno spostamento di peso in una data direzione fa inclinare lo scafo attorno a un asse di inclinazione avente direzione normale a quella dello spostamente e l'intensità angolare dell'inclinazione rimane la stessa qualunque sia la direzione dell'asse e dello spostamento del peso.

In questa proprietà degli scafi sommersi di dar luogo a una inclinazione angolare di costante valore qualunque sia la direzione nella quale avviene lo spostamento del peso, sta una notevole differenza di comportamento fra essi e i galleggianti, differenza che riesce accentuata e messa in evidenza dal fatto che, a cagione della forma allungata degli scafi, gli spostamenti di pesi possibili a bordo dei sottomarini in pratica riducentisi ai movimenti eventuali delle persone incaricate di alcune manovre, consistono in movimenti trasversali necessariamente piccoli e in movimenti longitudinali che

possono anche essere notevoli. E quindi, precisamente al contrario di quanto accade nei bastimenti ordinarii nei quali la distribuzione della resistenza alla inclinazione rende accentuate inclinazioni trasversali e toglie importanza alle longitudinali, il sottomarino è tale che su esso lo spostamento di un piccolo peso, per es. un uomo, il quale muovendosi da murata a murata potrebbe produrre l'inclinazione trasversale di meno che mezzo grado, ne produrrebbe una longitudinale di forse cinque gradi muovendosi da poppa a prora, e cioè produrrebbe una inclinazione longitudinale forse decupla di quella trasversale. Per contro sul sommergibile galleggiante in completa emersione di pieno carico il trasporto di un peso da poppa a prua produrrebbe una inclinazione longitudinale di intensità uguale a forse un decimo di quella trasversale che conseguirebbe al trasporto del peso stesso dal ciglio destro al ciglio sinistro della coperta. Vi è insomma una manifesta e completa inversione di fenomeno tra il galleggiante e il sottomarino.

Ma a scanso di equivoci di interpretazione e a costo di ripetermi devo avvertire che ciò che preoccupa in materia di attributi di stabilità longitudinale dello scafo sommerso e navigante in rotta rettilinea orizzontale non è tanto il valore assoluto della inclinazione o variazione di assetto in esso provocata dallo spostamento di un peso o da altra equivalente causa inclinante, quanto il fatto che in conseguenza di questa variazione di assetto resta alterata la distribuzione delle forze e resistenze operanti nel piano longitudinale verticale dello scafo, resta turbato il preesistente equilibrio delle coppie di stabilità di propulsione e di governo per il quale lo scafo poteva seguire una data rotta orizzontale. La quale perciò non potrà essere ulteriormente mantenuta salvochè si esegua una conveniente manovra dei timoni orizzontali e, se questa manovra di correzione non sia eseguita con sufficiente prontezza, può accadere che la causa inclinante, i cui effetti statici potevano anche essere non gravi, si manifesti dinamicamente col far mettere al sottomarino il naso fuori acqua o col farlo inclinare a capofitto verso il fondo o almeno col farlo indebitamente ballonzolare intorno al piano di profondità nel quale si vorrebbe costringerlo. Questa influenza diretta e immediata che le variazioni di assetto esercitano sulla rotta del sottomarino nel piano verticale e la grande sensibilità della rotta stessa a queste

variazioni costituiscono l'aspetto più importante degli attributi di stabilità longitudinale degli scafi sommersi: forse è questa sensibilità che fa da taluni rimproverare ai sottomarini il difetto di mancare di stabilità longitudinale. Vi è una operazione, inerente al servizio militare del sottomarino, anzi ragion d'essere della sua stessa esistenza, voglio dire il lancio del siluro, la quale, se non fosse circondata di convenienti cautele, metterebbe particolarmente in giuoco questo difetto e questa sensibilità. Il lancio del siluro si traduce nel nudo fatto meccanico dell'istantanea fuoriuscita di un peso di parecchie centinaia di chilogrammi da una delle estremità dello scafo e perciò tale da dar luogo a un complesso turbamento del preesistente equilibrio del sistema; la diminuzione della intensità dei pesi esistenti a bordo, l'alterazione della loro distribuzione longitudinale, l'eccentricità del luogo dove l'alterazione avviene, l'istantaneità del fatto tenderebbero a produrre sul sottomarino gravissima mutazione di assetto e di profondità, se con opportune dispozizioni non fosse provvisto affinchè la fuoriuscita del siluro sia accompagnata da un contemporaneo rapido riempimento del tubo di lancio con un peso d'acqua esattamente eguale a quello che era il peso del siluro.

§ 17. — *La stabilità statica del sottomarino nella manovra di sommersione.* — Queste nozioni riguardano lo scafo quando è completamente sommerso. Ma il sommergibile deve essere considerato nei suoi attributi di stabilità non soltanto negli stati estremi che esso realizza quando in emersione costituisce un ordinario galleggiante e quando in completa immersione costituisce un sottomarino; esso merita una attenzione tutta particolare anche nel periodo critico che attraversa durante la transizione da uno stato estremo all'altro, periodo durante il quale agli effetti di una graduale variazione della distribuzione di pesi e spinte che lo sollecitano si sovrappongono gli effetti della presenza degli specchi liquidi liberi dovuti alla posizione e grandezza del pelo liquido generico dell'acqua invadente le casse di zavorra. Com'è noto, gli attributi di stabilità statica di un bastimento dipendono dalla posizione di certi punti, il centro della carena, il centro di gravità del sistema materiale, il metacentro geometrico di carena e, se esistono specchi liquidi, il metacentro effettivo; una misura del grado di stabilità del galleggiante è offerta dal valore della

distanza — altezza metacentrica — che misura la sopraelevazione del metacentro effettivo sul centro di gravità, e perchè il bastimento sia stabile nella sua posizione diritta occorre che questa distanza sia positiva e anzi non discenda al di sotto di certi valori minimi suggeriti dall'esperienza. Durante il periodo di transizione del sommergibile dallo stato di libera galleggiabilità a quello di completa immersione, ognuno dei quattro sopraccennati punti viaggia per conto proprio, peraltro una scelta opportuna degli elementi fondamentali del progetto li costringe a viaggiare in modo che sempre il metacentro effettivo rimanga nel suo viaggio, e con buon margine di sicurezza, al di sopra del centro di gravità nel viaggio di questo. Per tal modo avviene che la natura della stabilità dell'equilibrio del sommergibile nel suo progressivo immergersi vada continuamente cambiando; la transizione si inizia e si svolge dapprima in fase di stabilità ordinaria, cioè col centro di gravità più alto del centro di carena e in modo che l'azione inclinante del peso distrugge una parte della resistenza all'inclinazione dovuta alla forma e grandezza della carena e del galleggiamento istantanei. Indi il sommergibile per un istante si trova col centro di gravità coincidente col centro di carena e cioè in quella condizione nella quale, secondo una locuzione dei testi di architettura navale, tutta la sua stabilità è stabilità di forma. Poi la transizione continua in fase di stabilità assoluta col centro di gravità posto più in basso del centro di carena; in questa fase l'influenza stabilizzatrice della forma è secondata da quella del peso e in maniera che al progressivo degradare dell'efficacia dell'una corrisponda un progressivo crescere dell'efficacia dell'altra, finchè, giunto lo scafo allo stato di completa immersione, il metacentro si confonde col centro di carena e ogni resistenza all'inclinazione è dovuta all'essere il centro di gravità posto al di sotto del centro di carena, ossia, secondo la locuzione classica, tutta la stabilità è stabilità di peso. Questa della stabilità assoluta, cioè del centro di gravità sottostante al centro di carena, è condizione necessaria per il sottomarino sommerso; taluni hanno erroneamente creduto che lo fosse altresì per tutti gli stati che il sommergibile attraversa.

L'esperienza del moderno naviglio sommergibile ha indicato che valori dell'altezza metacentrica complessivamente opportuni, e ben adatti alla odierna grandezza media di questi scafi, sono quelli di

circa cinquanta centimetri nell'emersione in completo carico e di circa venticinque nella completa immersione con che il minimum realizzato durante il periodo di transizione non scenda al di sotto di quindici centimetri. Valori non molto diversi da questi si incontrano normalmente nell'ordinario naviglio negli scafi di egual mole nelle varie immersioni per le quali essi passano fra la condizione di bastimento scarico e quella di bastimento in pieno carico. Ma quanto maggiore difficoltà incontra, nella scelta degli elementi che determinano il grado di stabilità, il progettatore di sottomarini il quale non può agire che sulla posizione del centro di gravità e del centro di carena, in confronto dell'ordinario architetto navale che ha a sua disposizione l'efficacissimo e docile strumento del metacentro! A dichiarazione degli stessi specialisti in materia di costruzione di naviglio sommergibile non è facile coordinare gli elementi fondamentali del progetto in maniera da assicurare la simultanea realizzazione di valori non inferiori a quelli ora indicati, ma in ogni modo è falsa la affermazione, che sovente si sente ripetere, secondo la quale nella transizione dallo stato di galleggiante a quello di sottomarino o viceversa il sommergibile si troverebbe necessariamente soggetto a valicare un punto di stabilità nulla e perciò esposto al pericolo di un capovolgimento.

A rendere possibile il possesso di un conveniente grado di stabilità in ogni stadio della fase di sommersione (o di emersione) giova la scelta giudiziosa della forma, della posizione, della grandezza e del frazionamento dei locali chiusi destinati a ricevere la zavorra d'acqua: per nulla invece influisce sulla stabilità statica del sottomarino immerso l'acqua contenuta nella intercapedine a libera circolazione, nella quale gli effetti di spinta e peso mutuamente si elidono nei loro effetti statici e la massa d'acqua contenutavi può soltanto, in quanto incontri resistenza a sfuggire attraverso i portelloni di libera circolazione, influire dinamicamente sui varii movimenti del sottomarino. In ogni modo l'assegnazione della vera e propria cassa di zavorra d'acqua deve essere subordinata ancora ad un'altra condizione e cioè alla conservazione della orizzontalità dello scafo durante le operazioni di sommersione ed emersione, orizzontalità che è tanto più facilmente insidiabile quanto più la progressiva evanescenza dell'area di galleggiamento tende a far sparire nello scafo

col dorso a fior d'acqua quella prevalenza della stabilità longitudinale sulla trasversale, che è propria degli ordinarii galleggianti. A questo scopo occorre avvicinare quanto più è possibile le casse di zavorra alla condizione che in esse il centro del pelo liquido istantaneo cada sulla verticale del centro di istantaneo galleggiamento.

§ 18. — *L'emersione lenta del sottomarino.* — Dopo aver indicati i mezzi coi quali può in pratica essere ottenuta la sommersione, la discesa e la conservazione di una data profondità d'immersione, sia in moto sia in stazione, mi occorre accennare ai mezzi coi quali può essere determinata l'emersione del sommergibile. Si può volere l'emersione lenta o l'emersione rapida.

L'emersione lenta va suddivisa in due stadii; in un primo stadio si ottiene la risalita dello scafo a fior d'acqua traendo partito dall'azione combinata della riserva fissa di spinta e da quella dell'inversione dei timoni di profondità o delle eliche orizzontali; in un secondo stadio si procede all'esaurimento dell'acqua immessa nelle casse di zavorra per gli scopi dell'affondamento. L'emersione rapida si compie in uno stadio solo, iniziando l'espulsione dell'acqua di zavorra fin da quando il battello è sommerso in profondità.

L'espulsione dell'acqua di zavorra può compiersi mediante impiego di pompe o mediante getto di aria compressa. Le pompe, talora del tipo rotativo e più sovente del tipo centrifugo, debbono avere potenza di esaurimento proporzionata alla massima profondità di sicurezza del sottomarino e debbono poter esaurire la zavorra in tempo relativamente breve, circa venti minuti se in profondità, circa cinque se a fior d'acqua. L'espulsione della zavorra per mezzo di getto d'aria avviene prelevando questa dalla batteria di serbatoi d'aria compressa predisposti per il servizio congiunto dell'esaurimento dell'acqua e del lancio dei siluri. Per la attitudine del battello a un prolungato servizio occorre che la quantità d'aria immagazzinata sotto pressione nei serbatoi sia tale da permettere una molteplice ripetizione dell'operazione di esaurimento, almeno quattro o cinque volte. La provvista di aria, che viene immagazzinata sotto una pressione da una a due centinaia di atmosfere, è fatta mediante compressori azionati direttamente o indirettamente dalle motrici principali stabilite a bordo per la propulsione subacquea: per l'effi-

cienza militare del sommergibile interessa che la ricomposizione della provvista di aria possa avvenire in poche ore, circa tre. È ovvio che l'impiego dell'aria compressa come mezzo di rapida risalita debba avvenire sotto l'osservanza di particolari cautele, allo scopo di evitare lo sviluppo di forti pressioni che i fasciami interni ed esterni dei compartimenti di doppio fondo non saprebbero sostenere, e per evitare le sinistre conseguenze di un'anticipata apertura dei portelli durante le oscillazioni verticali conseguenti ad una risalita con abbrivo.

§ 19. — *L'emersione rapida del sottomarino.* — Per il sottomarino la possibilità di risalire in superficie anche quando una causa indipendente dalla volontà dell'uomo lo abbia portato sul fondo costituisce una garanzia di salvezza; perciò accanto ai sopradescritti mezzi ordinarii di emersione si trovano sistemati anche dei mezzi da impiegarsi eccezionalmente: gli uni e gli altri costituiscono nel loro insieme *i mezzi di sicurezza* del sottomarino. Appartengono ad essi:

1° La sistemazione per l'espulsione della zavorra d'acqua mediante getto di aria compressa, in quanto tale espulsione non resti impedita in un fondo melmoso dalla eventuale ostruzione delle valvole di carena;

2° La sistemazione delle ordinarie pompe di esaurimento, in quanto queste siano capaci di vincere il carico dovuto alla profondità cui è sceso il battello, la resistenza d'una eventuale ostruzione delle valvole e l'indebita adesione della zavorra di sicurezza;

3° La sistemazione di una zavorra solida di sicurezza, prevista in una ragionevole misura di circa il cinque per cento del dislocamento, tenuta aderente all'esterno dello scafo con artifizi tali che permettano di poternele facilmente dall'interno dello scafo distaccare a scocco o, se occorre, forzatamente spingere in fuori.

4° In via indiretta, la sistemazione di paratie stagne. Questa sistemazione, combattuta da alcuni come dannosa alle condizioni morali dell'equipaggio, è sostenuta da altri come utilissima sia per limitare gli effetti dell'allagamento dei locali e il conseguente aumento di peso dello scafo sommerso, sia, e forse sopra tutto, per ovviare all'eventualità che una quantità di acqua anche piccola, essendo libera di correre da poppa a prua seguendo l'inclinazione dello scafo

possa produrre su questo forti effetti di aumento dell'inclinazione In questo ordine di idee si trova bensì utile che le paratie stagne esistano, ma non necessario che le porte di cui esse sono provviste al loro centro restino costantemente chiuse; in questo modo il fatto di essere le porte normalmente aperte e permettere la mutua visione e comunicazione fra i varii membri del personale, ne tiene alto il morale e ne agevola l'adempimento delle rispettive mansioni, il fatto di essere le soglie delle porte stagne alquanto sopra elevate sul pagliolo limita gli scorrimenti delle piccole invasioni d'acqua, infine il fatto che le paratie stagne esistano e se ne possano chiudere le porte circoscrive gli effetti delle grandi irruzioni e li rende forse meno disastrosi, se la capacità dei locali separati da paratie stagne è tale che il peso di acqua che può irruire in uno, o meglio in due di essi, sia inferiore alla capacità dei mezzi di sollevamento di cui il battello dispone.

Quando l'impiego dei mezzi di sicurezza offerti dalle descritte sistemazioni non abbia valso a determinare la risalita di un sottomarino trattenuto sul fondo da impigliamento nel fango o da allagamento parziale per squarci nel fasciame, per urto, per eccesso di pressione, per cattiva tenuta di giunti, per irruzione d'acqua attraverso aperture di coperte imperfettamente chiuse al momento dell'immersione, occorre allora aver ricorso a mezzi di salvataggio e ricupero dell'esterno. Questi, che sono possibili se l'affondamento è avvenuto in profondità non inaccessibile al palombaro, consistono generalmente in tentativi di sollevamento del sottomarino imbragandolo mediante maniglioni all'uopo predisposti, con cavi facienti capo a cassoni di sollevamento ad aria compressa o a verricelli di navi e pontoni.

§ 20. — *La propulsione dei sottomarini.* — In quanto ho sinora esposto intorno al naviglio sommergibile ho più volte accennato alla esistenza in esso di una sorgente di energia mediante la quale si provvede ad azionare i macchinari destinati alle varie manovre, in particolare il macchinario di propulsione, che è il più importante di tutti in quanto che è quello che nella navigazione in superficie serve a fare del sommergibile un bastimento nel senso ordinario, e in quanto nella navigazione subacquea è dalla propulsione stessa che viene de-

sunta la possibilità di discendere, mantenersi in profondità, risalire o comunque evoluire.

Dagli ideatori di scafi appartenenti al naviglio sommergibile si è sempre guardato con desiderio alla possibilità di avere a bordo un solo macchinario motore da potersi impiegare in entrambe le forme di navigazione: la cronaca dei sommergibili offre esempi di tentativi nei quali tanto in superficie quanto in immersione la propulsione del battello era affidata all'opera o di soli motori elettrici, o di soli motori a vapore o di soli motori a combustione interna. L'uso simultaneo dei motori elettrici in entrambe le navigazioni si mostrò inefficace, essenzialmente per la grande limitazione che il peso degli accumulatori impone alla velocità in superficie; i motori a vapore, pregevoli per l'ordinaria navigazione in superficie, e che nella navigazione subacquea avrebbero dovuto a fuochi spenti consumare il vapore accumulato in una caldaia nella permanenza a fior d'acqua coi fuochi in attività, risultarono inadatti alla navigazione sottomarina essenzialmente per il grande sviluppo di calore cui dànno luogo. I motori a combustione interna, almeno quelli dei tipi sperimentati sino a poco tempo addietro, furono analogamente giudicati inadatti alla navigazione sottomarina perchè col consumo dell'aria, con lo sviluppo di calore, di emanazioni e di romore vi peggiorano grandemente le condizioni di abitabilità.

Onde allo stato attuale della tecnologia del naviglio del quale mi occupo, l'apparato motore di un sommergibile ne comprende due, facienti bensì capo ai medesimi propulsori, ma altrimenti distinti fra loro per le funzioni e per il tipo, essendo l'uno, motore termico, destinato alla navigazione in superficie e l'altro, motore elettrico, destinato alla navigazione subacquea. La contemporanea presenza di apparati motori termici e di apparati motori elettrici, mentre che giova separatamente alle differenti esigenze delle due forme di navigazione, conferisce ai moderni sommergibili la proprietà di essere *autonomi*, cioè la proprietà di potere al largo coi proprii mezzi e col solo uso della propria provvista di combustibile sia ricaricare la batteria di accumulatori elettrici mediante la reversione dei motori elettrici fatti funzionare come dinamo trascinate dai motori termici, sia ricaricare la batteria dei serbatori dell'aria compressa necessaria al servizio dell'abitabilità, dell'emersione e dei siluri facendo a tale

uopo funzionare gli appositi compressori d'aria. Ognun vede, quanto estesa e complessa, indipendentemente dagli scopi della propulsione in superficie, diventi la funzione del motore termico nel naviglio sommergibile.

§ 21. — *Motori per la navigazione sopracquea.* — Come motori termici per la navigazione in superficie furono proposti e adottati gli apparati motori a vapore dei tipi leggeri e perfezionati usati nel naviglio torpediniero, in associazione con caldaie a tubi d'acqua e a combustione di petrolio. Ma furono ripudiati perchè pesanti (circa quaranta kg. per cav. ind.), ingombranti (occupando poco meno di cento dcm. cubi per cav. ind.), irradianti calore e svolgenti emanazioni di petrolio nel loro silenzio durante le immersioni, infine perchè inadatti a una rapida ripresa del funzionamento dopo il ritorno del battello alla superficie.

I motori termici a combustione interna si presentano come più utili per la navigazione in superficie. Essi, nei quali il motore rappresenta l'insieme della caldaia e della motrice nell'apparato motore a vapore, riescono in confronto di questo di gran lunga meno pesanti (non più di venti kg. per cav. sull'asse) e meno ingombranti (mediamente trenta dcm. cubi per cav.); sono economici nel consumo di combustibile consumando per cav. e per ora meno di 300 grammi di benzina o petrolio contro i milleduecento grammi di carbone o gli ottocento di petrolio degli impianti a vapore; sono repentinamente raffreddabili con circolazione di acqua nel passaggio dello scafo dalle navigazioni sopracquee alle subacquee, hanno notevole prontezza di rientrata in funzionamento nel ritorno da questa a quella. Per contro al loro impiego vanno associati degli inconvenienti non lievi, la complicazione dei meccanismi, la romorosità della marcia, la necessità di una sorgente moto elettrica esterna di energia per la messa in moto, infine e sopra tutto i pericoli inerenti alla facile infiammabilità del fluido che li alimenta, resa più temibile dalla ristrettezza dell'ambiente e dall'eventuale concomitanza di scintille per parte dell'impianto elettrico. Malgrado tutto, negli ultimi dieci anni essi si sono imposti nella costruzione del naviglio sommergibile; soltanto recentemente la dolorosa esperienza che alcune nazioni, fra le quali l'Italia, hanno fatto dei pericoli proprii del-

l'impiego della benzina come combustibile nel naviglio sommergibile, ha orientate le preferenze dell'opinione pubblica verso i motori a combustione interna che si servono di olii ad alto punto di infiammabilità. È probabile che nel prossimo avvenire i nuovi sommergibili saranno provvisti di motori funzionanti a olio pesante, a dirittura a naftetine; ciò diminuirà di gran lunga i pericoli di scoppio che ora sono proprii del naviglio sommergibile, ma a questo riguardo non è da tacere che molti competenti ritengono che i pericoli proprii dell'attuale impiego di olii leggeri, ossia di benzina, non sono da attribuirsi al fatto stesso della presenza di questa a bordo, ma a difetto delle sistemazioni e manipolazioni relative al suo imbarco, alla sua conservazione e al suo passaggio dalle casse di deposito ai motori. Se sistemazioni e manipolazioni fossero, come ora si studia di ottenere, tanto accurate da impedire che nessun contatto possa avvenire tra benzina e aria fuori dei cilindri motori, l'impiego della benzina nei sommergibili, al quale vanno associati diversi vantaggi di buon funzionamento del macchinario, sarebbe altrettanto sicuro che quello degli olii pesanti.

§ 22. — *Motori per la navigazione subacquea.* — Per la navigazione subacquea il solo tipo di motore che si sia dimostrato efficacemente impiegabile è il motore elettrico, il quale soddisfa abbastanza bene a molti dei requisiti che si possono porre a un motore subacqueo: salva la produzione del molesto aumento di temperatura che segue un suo funzionamento un po' prolungato, esso non peggiora le condizioni di abitabilità dell'ambiente con consumo di aria o con sviluppo di gas; non dà manifestazioni esterne che tradiscano al nemico la presenza del sottomarino. In esso la erogazione di energia avviene senza variazione di peso nel battello e cioè senza alterazione delle sue condizioni di riserva di spinta; esso è obbediente, silenzioso, pronto, regolabile per le diverse andature, invertibile nella marcia per far andare indietro il battello, reversibile nel funzionamento per far da dinamo anzichè da motore. Infine l'erogazione dell'energia elettrica è frazionabile in più motorini e si lascia docilmente adattare a molte manovre accessorie e ai servizi ausiliarii dell'illuminazione, delle pompe, della ventilazione, del riscaldamento, della cucina, ecc.

Ma considerato in associazione con la sua sorgente di energia, che è la batteria degli accumulatori elettrici, la sistemazione di motori elettrici nei sottomarini è lontana dal meritare elogi. Essa riesce eccessivamente pesante. In un impianto elettrico il motore rappresenta ciò che in un impianto a vapore è la motrice propriamente detta e la batteria degli accumulatori vi rappresenta l'insieme della caldaia e della provvista di combustibile. Ora il peso del motore elettrico in sè si può nelle sistemazioni dei sottomarini ragguagliare in non più che trentacinque o quaranta chilogrammi per chilowatt e il peso della batteria di accumulatori, riferito alla potenza di cui questi sono capaci e al tempo in cui si vuol far avvenire la loro scarica, risulta in ragione di circa settantacinque o cento chilogrammi per chilowatt ora se si considera una durata media di discarica di circa cinque ore: in un impianto a vapore il peso della motrice non sarebbe superiore ai quindici kg. per cav. ind. nè il peso cumulativo della caldaia e del combustibile occorrente a un funzionamento di cinque ore supererebbe i trenta kg. per cav. ora. Questi numeri dimostrano che sotto il riguardo del peso in confronto all'energia sviluppata l'impiego dell'impianto elettrico, e in particolare degli accumulatori, è semplicemente disastroso; del resto gli accumulatori presentano inconvenienti anche sotto il riguardo della cura che la loro manutenzione richiede, sotto il riguardo del costo e della rapidità con la quale diventano inadatti a un efficace servizio, infine sotto il riguardo dello sviluppo di vapori acidi e di gas esplosivi, ad eliminare i pericoli dei quali si è in Italia provveduto dal Laurenti chiudendo ermeticamente i singoli elementi della batteria e collegandoli tutti con una tubulatura di drenaggio ed espulsione delle loro emanazioni gasose.

Con una frase abituale agli ingegneri navali io dirò che nell'equazione del bilancio fra il dislocamento e la somma dei pesi che lo determinano i termini relativi all'apparato motore e alla sua provvista di combustibile si scindono ciascuno in due parti, una relativa all'apparato motore per la navigazione in superficie, l'altra relativa alla navigazione subacquea. Il fatto stesso di questo sdoppiamento, congiunto con l'elevatissimo valore dei coefficienti unitarii di peso relativi alla seconda delle due forme di navigazione, rende molto alta la frazione del dislocamento assorbita dal peso dell'apparato

motore e dalle sue dipendenze. Questo fatto, associato con l'altro che le esigenze della navigazione subacquea obbligano a fare lo scafo necessariamente più robusto e più pesante e più complicato che quello di un ordinario galleggiante, impedisce al sommergibile di competere in velocità con l'ordinario naviglio torpediniero nella navigazione in superficie e limita ai quindici nodi circa la velocità massima in esso raggiungibile con l'ordinaria grandezza degli scafi appartenenti a questa specie di naviglio e non lascia sperare che il limite indicato possa essere sensibimente superato nemmeno con grandezze maggiori. Ma dentro questo limite di velocità massima il sommergibile può assumere in superficie, come ogni altra nave militare, dei regimi di andatura abbastanza discosti fra loro, dall'andatura di bassa crociera la quale con l'erogazione di circa centocinquanta cavalli permette a un sommergibile di media grandezza di navigare sopra il suo massimo raggio di azione, all'andatura veloce corrispondente allo sviluppo massimo di potenza di cui le motrici sono capaci e cioè, sempre per un sommergibile di grandezza normale, allo sviluppo di circa ottocento cavalli. Nel più recente tipo italiano di sommergibili si è voluto provvedere perchè questi diversi regimi di velocità fossero raggiunti con la minor possibile dispersione di energia motrice in attriti interni dei macchinarii in moto, e perciò l'apparato motore termico consta di tre distinti complessi, due laterali e uno centrale, agenti ciascuno sopra una propria elica propulsatrice e disposti in modo che la sola elica centrale entri in azione nell'andatura di crociera, le sole eliche laterali nella navigazione ordinaria a velocità moderata, infine tutte e tre nell'andatura a tutta potenza.

La velocità subacquea è anch'essa limitata, dal peso altissimo dell'unità di potenza sviluppata mediànte macchinario elettrico ed è limitata altresì dalle forme di carena non precisamente corrispondenti a quelle di minima resistenza per un corpo sommerso, dalla presenza di molteplici appendici di carena e dorsali, dalla continua manovra che devesi fare dei timoni di profondità e di direzione per mantenere la stabilità dell'immersione, dell'orizzontalità e della via, infine dal fatto che, per poco che sia elevata la velocità, risulta troppo appariscente il solco superficiale tracciato dai tubi degli apparecchi di visione, cessando così pel sottomarino il vantaggio di

essere invisibile al nemico. Una velocità di otto, in ogni più favorevole ipotesi di dieci, miglia all'ora rappresenta per ora il limite delle aspirazioni in fatto di velocità subacquea; per convincersene basta porre mente al fatto che a un sottomarino, avente in immersione la media grandezza di duecencinquanta tonnellate e al quale potrebbero bastare trenta cavalli eff. per mantenere la modesta velocità di cinque nodi, ne occorrerebbero almeno duecento per raggiungere la velocità di dieci nodi e forse non gliene basterebbero mille per raggiungere quella di quindici.

§ 23. — *Visione e dirigibilità.* — Uno dei punti che più intensamente interessano l'attenzione di coloro che per la prima volta portano il loro pensiero sul naviglio sottomarino è la questione delle sue condizioni di visione e di abitabilità. Mi limiterò a pochi cenni intorno a queste questioni.

In riguardo alle condizioni di visione (e in pari tempo di dirigibilità) si possono distinguere nel sommergibile stati diversi, e sono quelli:

1° Di completa emersione quando esso, nelle condizioni del suo pieno carico e completo assetto, liberamente galleggia in riposo o naviga coi suoi motori termici in moto, comandato da un palco di comando esterno allo scafo e perciò, quanto a visione e dirigibilità, si trova nelle condizioni di un'ordinaria torpediniera;

2° Di vedetta, quando galleggia o naviga tenendo il dorso a fior d'acqua e stando pronto a scomparire quandochessia mediante l'eliminazione della sua riserva residua di spinta e avendo tanta visione quante gliene consentono i vetri della torretta di comando;

3° Di agguato e di navigazione subacquea normale, quando galleggia o naviga sommerso o sta adagiato in basso fondo tenendo fuori acqua soltanto l'estremità di alcuni suoi speciali apparecchi di visione sottomarina indiretta, che ne costituiscono l'occhio;

4° Di completa immersione in profondità, nel qual caso esso è completamente cieco e, come avviene per un bastimento ordinario immerso in una fittissima nebbia, non ha altro mezzo di direzione che la bussola, altro mezzo di valutazione delle distanze percorse che il cronometro e la nozione della sua andatura di macchina.

Di apparecchi per la visione sottomarina indiretta ne furono

escogitati molti, dai semplicissimi a quelli piuttosto complicati, ma la soluzione buona del nuovo problema che con essi si poneva agli ottici è recente. Ne furono costruiti sul concetto degli strumenti a riflessione e su quello degli strumenti a refrazione. Quelli della prima specie, che presero il nome di periscopi dalla funzione di ispezionar l'orizzonte cui essi dovrebbero soddisfare nei sottomarini, furono di vario tipo; uno dei più comunemente descritti dai libri e dei meglio auspicati all'atto della sua introduzione, fu un apparecchio costituito da un anello riflettente di rivoluzione a sezione meridiana parabolica il quale, posto all'estremità superiore di un tubo emergente dal dorso del battello, avrebbe dovuto raccogliere i raggi visuali provenienti dal giro di orizzonte e, per una nota proprietà della parabola, deviarli concentrandoli in un fuoco cadente nell'interno dello scafo, dove l'imagine piccolissima del giro d'orizzonte raccolta in uno schermo avrebbe potuto essere osservata e ingrandita con un microscopio: la pratica dimostrò la completa inefficacia dell'apparecchio. Alla categoria degli strumenti di visione indiretta a riflessione appartengono diversi tipi di tubi ottici, che ebbero larga diffusione nel naviglio sottomarino; portano all'estremità superiore ed emergente di un tubo verticale uno specchio inclinato o un prisma a riflessione destinato a riflettere l'imagine degli oggetti esterni lungo il tubo sopra un altro specchio inclinato di fronte al quale si colloca l'osservatore. Questi mediante la rotazione dell'intero tubo è in grado di scrutare tutto l'orizzonte; lo strumento in grazia della mancanza di lenti dà imagini chiare, in grandezza naturale e, ciò che è un vantaggio, visibili con entrambi gli occhi a un tempo; ma grave difetto dell'apparecchio è la piccolezza del suo campo, piccolezza inevitabile data la necessità di avere dei tubi lunghi non meno di cinque metri e di diametro non superiore ai quindici centimetri circa.

Gli apparecchi di visione sottomarina facienti capo agli strumenti diottrici o a rifrazione furono dapprima, salvo opportuni adattamenti, dei veri e proprii cannocchiali ordinarii, sia astronomici sia terrestri; ma anch'essi risultarono inefficaci e per la visione monoculare e sopra tutto per la piccolezza del campo, al quale, a meno di adottare lenti grandissime e costosissime o tubi eccessivamente corti per il buon impiego del sottomarino, non si saprebbe far superare il valore di due o tre gradi. Questa piccolezza di campo, non

dannosa nelle ordinarie osservazioni in terra, e nemmeno dannosa all'osservazione di un oggetto determinato dall'interno di un sommergibile, toglie ogni valore al cannocchiale come strumento sottomarino di scoperta.

Agli strumenti diottrici a piccolo campo, rappresentati dai cannocchiali, fa riscontro una categoria di strumenti diottrici a gran campo, studiati e introdotti appunto per soddisfare alle esigenze del servizio del naviglio sottomarino. Ebbero vario nome a seconda dei varii tipi all'uopo imaginati; il tipo italiano, dovuto agli ingegneri della marina Laurenti e Russo, ebbe il nome di cleptoscopio e fu ideato in due forme, una per la visione monoculare e un'altra per la visione bioculare. Nella prima forma esso, ridotto a schema, consta di un lungo tubo, sporgente dallo scafo e terminante in alto con una lente obbiettiva la quale di un panorama esterno dà internamente al tubo un'imagine reale rovesciata la quale viene raccolta sopra un vetro smerigliato donde, diventando luminosa per proprio conto, è mediante una lente di trasporto trasformata presso l'estremità inferiore del tubo in una nuova imagine reale diritta, la quale viene osservata diritta e ingrandita per mezzo di una lente oculare a guisa di ordinario microscopio semplice con un occhio solo.

La seconda forma di cleptoscopio ha inteso di risolvere il problema di poter osservare, stando in un sottomarino, il panorama come esso si presenterebbe osservandolo da un portellino circolare in un casotto di navigazione, cioè con gran campo avanti a sè e con la visione bioculare, che sola non stanca la vista e dà il modo di apprezzare la distanza degli oggetti dall'osservatore. Per ottenere ciò occorreva che la lente oculare fosse di gran diametro e, per evitare eccesso di spessore di assorbimento e di aberrazione, occorreva altresì che fosse di moderato ingrandimento e quindi che essa fosse destinata ad ingrandire un'imagine già piuttosto grande e preferibilmente un'imagine più raccolta in basso e resa luminosa su uno schermo smerigliato anzichè la semplice imagine determinata da una lente. L'introduzione dello schermo smerigliato inferiore consiglia, perchè non nè resti troppo diminuita la chiarezza, che allo schermo smerigliato superiore della prima forma di cleptoscopio venga sostituita una lente di condensazione a fortissima convergenza, capace di deviare i raggi provenienti dalla lente obbiettiva verso una lente

intermedia di raddrizzamento che a sua volta determina sul vetro smerigliato in basso l'imagine da osservare coi due occhi mediante la lente oculare di gran diametro. L'apparecchio conserva quasi integralmente il campo proprio della lente obbiettiva e quindi può facilmente aver un campo di circa sessanta gradi: inoltre la lente oculare viene scelta in modo che nell'imagine virtuale data dalla lente oculare gli oggetti appaiano sotto gli stessi angoli visuali sotto i quali essi si vedrebbero ad occhio nudo.

La sommaria descrizione qui fatta rappresenta l'apparecchio nel suo schema ottico, non nella sua pratica esecuzione, la quale in luogo delle semplici lenti obbiettive, di condensazione e di raddrizzamento introduce altrettanti sistemi di lenti destinati a rimuovere le varie aberrazioni; in alto e in basso introduce altresì dei mezzi di deviazione dei raggi orizzontali, infine introduce dei mezzi per variare la distanza focale della lente di raddrizzamento e così permettere la adattabilità della lunghezza del tubo alle varie profondità di immersione.

Per la presenza del vetro smerigliato l'imagine finale riesce non tanto brillante: per ovviare a questo inconveniente vengono associati, l'uno presso all'altro, due cleptoscopi, uno a visione bioculare. l'altro a visione monoculare; col primo chi dirige la navigazione acquista una nozione comprensiva di ciò che l'orizzonte presenta. col secondo senza muoversi dal posto, osserva con maggior chiarezza e con ingrandimento un oggetto determinato e lo scruta nei suoi particolari come farebbe con un ordinario cannocchiale. I cleptoscopi italiani hanno avuta meritata fortuna: le marine straniere ne provvedono ora il loro naviglio sottomarino di nuova costruzione.

§ 24. — *Abitabilità dei sottomarini.* — Circa l'abitabilità dei sottomarini ho da dire poche cose e meno gravi di quelle che la generalità potrebbe aspettarsi. Fin che i sottomarini furono di piccola mole, la questione della loro abitabilità e della respirazione dell'equipaggio nel loro interno era discussa come una questione che dovesse vivamente impensierire. Ma col progressivo crescere della grandezza degli scafi destinati alla navigazione subacquea la questione andò perdendo d'importanza e omai può dirsi che praticamente essa ha cessato di esistere, avendo l'esperienza dimostrato che la quantità

d'aria imprigionata nel cavo di un sommergibile all'atto della sua immersione è sufficiente per permettere ai dieci o quindici uomini sani e robusti, che ne compongono l'armamento, di respirarvi e vivervi senza sensibili inconvenienti fisiologici non solo per il breve numero di ore – quattro o cinque – durante le quali è probabile che un sommergibile sia normalmente chiamato a rimaner sommerso senza la possibilità di risalire qualche minuto in superficie a rinnovarvi la sua aria, ma anche durante quella maggiore permanenza subacquea – il periodo di tempo compreso fra l'alba e il tramonto – durante la quale i casi di guerra marittima possono costringere il sommergibile a tenersi occultato.

Questa constatazione di fatto è fortemente in contrasto con le indicazioni date dagli igienisti circa la quantità e la purità dell'aria normalmente occorrente alla respirazione, tanto è vero che secondo le indicazioni degli igienisti occorrerebbero degli spazi ampi almeno dieci volte tanto quelli adottati nei sottomarini attuali. Ora sia per tener conto di ciò, sia per provvedere l'ipotesi di una prolungata volontaria o forzata permanenza sott'acqua, sono stati proposti e talora adottati degli artifizi intesi ad assicurare la permanente respirabilità dell'aria, insidiata dallo sviluppo di acido carbonico da parte degli organismi umani ivi coabitanti. Tali artifizi consistono essenzialmente:

1º O nell'espulsione dell'aria viziata fatta nella parte inferiore dello scafo mediante un drenaggio comandato da opportuni adattamenti dei compressori e nel contemporaneo attingimento di nuova aria dai serbatoi dell'aria compressa;

2º Oppure nella rigenerazione dell'aria viziata, facendo circolare l'aria dell'ambiente attraverso una soluzione di idrato sodico capace di assorbire il biossido di carbonio e di restituire un corrispondente volume di ossigeno.

Ma con entrambi i procedimenti si dà facilmente luogo a un eccesso di ossigeno, che conferisce al sistema nervoso del personale una eccitazione non meno dannosa della sonnolenza che suole prodursi in capo a una durata d'immersione alquanto prolungata. Del resto è da notarsi che l'aria imprigionata nel sottomarino all'atto della sommersione è alla pressione atmosferica e tale si mantiene durante la permanenza subacquea, se si estragga dall'effetto di lievi

fughe dai serbatoi d'aria compressa. Chi è nell'interno del sottomarino rimane insensibile alle variazioni esterne di pressione e non si accorge del progressivo affondamento dello scafo se non in quanto osservi il silente corso della lancetta di un manometro lungo la graduazione del quadrante: egli non si accorge nemmeno del moto di avanzamento se non in quanto questo gli sia richiamato alla mente dal brusio dei motori elettrici in movimento. Per il fatto ben noto che l'agitazione superficiale del moto ondoso si smorza assai rapidamente nel passare agli strati sottosuperficiali, avviene che nel sottomarino non vi è luogo nemmeno a moti di rollio e di beccheggio e che in esso oscillazioni e relativi sforzi d'inerzia si sviluppano, e debolmente, solo in seguito a imperfetto possesso della stabilità di rotta orizzontale. Ne segue che lo stato di navigazione in immersione è caratterizzato da una notevole calma e non dà luogo a particolari sensazioni fisiologiche (esclusa la tendenza alla sonnolenza) nè a particolari pericoli, nè a particolari disagi oltre quelli della immobilità prolungata, del silenzio e della tensione di nervi e di mente, che non siano quelli provenienti dall'eventuale rottura della ermeticità dei giunti o dalla presenza di residui di gas combusti o di vapori di benzina rimasti dalla navigazione in superficie, o infine dai miscugli detonanti provenienti dalle esalazioni degli accumulatori.

Meno buone e meno tranquille sono le condizioni di vita nella navigazione in emersione; intanto l'assorbimento di spazio interno dovuto al doppio macchinario di propulsione, ai depositi del combustibile e della zavorra d'acqua, alla batteria degli accumulatori, ai serbatoi d'aria compressa, ai tubi di lancio e ai siluri, alle varie pompe, agli organi di comando dei molteplici timoni, ai molti apparecchi di controllo, indicatori di profondità e delle inclinazioni istantanee, non consentono disposizioni di abitabilità altro che rudimentali; nei sommergibili non vi sono che posti di manovra e di combattimento, non alloggi nel senso ordinario della parola, tanto che la vita dell'equipaggio addetto a una squadriglia di sommergibili si svolge generalmente non sui sommergibili stessi ma su una apposita nave-appoggio. Sul sommergibile in moto nella navigazione in superficie la durezza del rollio e del beccheggio propria del naviglio torpediniero, la facilità che ha il mare di salire sui fianchi rientranti e sul ciglio arrotondato del ponte, inoltre la necessità di tener le

persone tutte raggruppate presso il palco di comando rendono malagevole la permanenza sul ponte agli uomini destinati ai servizi di coperta: nello stesso tempo il calore, le emanazioni e il frastuono provenienti dai motori a scoppio rendono penosa quella nei locali inferiori agli uomini destinati ai servizi di macchina. Ma ogni marina che possiede naviglio sottomarino, e la nostra Italia non meno delle altre, ha l'orgoglio di poter dire che nè certezza di penosa condizione di vita nè presagio di pericoli proprii di questa specie di naviglio nè terrore di disastri accaduti hanno mai diminuito il numero dei volenterosi che aspirano a servire il proprio paese nel maneggio di questo recente strumento di potenza militare.

L'impiego di questo, nella presente opinione della generalità dei competenti, è presunto come utile essenzialmente nella difesa delle coste, alla quale il sommergibile concorre con la vigilanza di una data estensione di coste e col lancio di siluri contro una nave nemica che invada una data zona. Il suo più efficace modo di impiego è considerato il seguente. Raggiunta navigando in superficie la zona assegnatagli per la vigilanza, il sommergibile si dispone in vedetta, e se sospetta la presenza del nemico si dispone in agguato sia incrociando in profondità sia stando adagiato su un basso fondo. Se avvista la nave nemica le muove incontro in posizione prima di agguato e poi di completa scomparsa; giunto a distanza utile di tiro coi moderni siluri (non più di mille metri nè meno di cento) lancia il siluro e si ritira, protetto dalla invulnerabilità che, meglio di ogni corazza, gli conferisce lo strato d'acqua che lo avvolge.

Col lancio del siluro il sottomarino ha adempiuto al suo ufficio verso la sua bandiera; col portare la mia esposizione sino a questo punto io penso di aver adempiuto al mio verso i miei benevoli ascoltatori.

PIETRO ROVETTI

I PALLONI DIRIGIBILI

§ 1. — *Condizioni generali del problema.* — La conquista dell'aria ha fatto nel 19° secolo un cammino immenso. Attualmente si distinguono almeno tre soluzioni teoriche del problema della navigazione aerea.

La prima consiste nella utilizzazione delle correnti atmosferiche. Si sa che a differenti altezze la velocità del vento può variare di grandezza e di velocità. Per spostarsi da un punto ad un'altro basterebbe, con convenienti manovre di valvola e di zavorra, di lasciarsi trascinare da correnti convenienti. Sfortunatamente non ci si può muovere, a partire da ciascun punto della traiettoria, che nell'interno dell'angolo che fanno le correnti estreme passanti per la verticale di questo punto. Ora questo angolo è spesso piccolissimo ciò che, oltre alle difficoltà pratiche, riduce questo procedimento a dei limiti che lo rendono inapplicabile.

La seconda soluzione è l'aviazione, ossia la sostentazione ottenuta, sia come per gli uccelli da un battito d'ali dovuto all'energia muscolare o alla potenza di un motore, sia da eliche ad asse verticale, sia ancora per mezzo di piani attaccanti l'aria obliquamente.

Infine la terza soluzione è quella del più leggero dell'aria, o per meglio dire del « pesante come l'aria ».

Infatti il sostentamento nell'aria si ottiene per mezzo di gas leggeri, come il galleggiamento nell'acqua si ottiene con dei materiali come il legno. Ma qui si arresta il paragone; se le navi galleggiano alla superficie dell'acqua, perchè sono meno pesanti di essa, i corpi, anche se più leggeri dell'aria, non sono suscettibili di trovare una superficie di galleggiamento completamente stabile, al disopra o al disotto della quale essi possano immergersi o sollevarsi in seguito ad una modificazione del loro peso o della spinta.

È più conveniente paragonare un dirigibile ad un sottomarino, essendo esso immerso completamente in un mezzo omogeneo. Tale dirigibile abbandonato a sè stesso partecipa forzatamente alla velocità del mezzo ambiente; al contrario collocando nella navicella un congegno motore qualsiasi col quale si possa spingere l'aria dall'avanti all'indietro, si avrà un punto d'appoggio sull'aria stessa, si otterrà quindi la propulsione del pallone. Se a questo motore, adattato ad un pallone allungato, aggiungiamo un timone, simile a quello delle navi, noi avremo applicate le nozioni fondamentali che si sono presentate alla mente dei primi inventori.

§ 2. — *Velocità dei venti.* — Prima di iniziare lo studio dei palloni dirigibili conviene dire qualche parola sul loro principale nemico, il vento, questo scoglio temibile della navigazione aerea.

Questo spostamento d'aria può essere considerato provvisoriamente come uniforme e rettilineo in una certa regione attorno ad un punto. Se si ha una azione distruttiva sugli alberi, sulle case ed anche sui palloni frenati, che sono legati invariabilmente ad un suolo fisso, non è lo stesso per un corpo come il pallone libero, libero di ogni legame, che può partecipare esattamente ai movimenti del fluido che lo circonda.

Per dirigersi quindi in tutti i sensi e tutti i giorni nell'aria occorre comunicare all'areostato una velocità almeno uguale a quella del vento più violento. Secondo una tabella comprendente le velocità e le frequenze dei venti, composta dall'esimio cultore di scienze areonautiche Colonnello Renard del Parco areostatico di Chalais-Meudon, si vede che con un motore della velocità di metri 2,50 al secondo, si potrebbe sortire un giorno su dieci; se si porta questa velocità a metri 12,50, si potrà sortire 4 giorni su 5 e rimontare la corrente colla velocità di metri 2,50 sette giorni su 10. Sarebbe già un successo apprezzabile, poichè, nella maggior parte dei casi, le tempeste hanno dei segni precursori, e non ci si imbarcherà se si teme un vento violento.

§ 3. — *Legge delle onde aeree.* — Noi abbiamo supposto sin qui che l'aria si sposti con un movimento rigido, in massa; è una semplificazione troppo grande perchè alcuni fatti connessi non vengano a modificarla.

Si ha da principio il fenomeno ben conosciuto delle raffiche, che si osserva dappertutto in caso di venti un pò forti. I colpi di vento vengono registrati sul cilindro dell'anemometro per mezzo di salti bruschi, ripetuti di minuto in minuto, e per mezzo di massimi e minimi distanti più che non il valore medio della velocità.

Langley ha visto in questo « lavoro interno del vento » la spiegazione del volo « à voile » di certe specie di uccelli che planano nella direzione del vento, senza movimento d'ali e senza sforzi apparenti, dando lo spettacolo singolare di un corpo immobile che si sostiene nell'aria e vi si muove durante delle ore. Egli suppone che questi uccelli non possano sostenersi nè per mezzo di correnti ascendenti, che sono assai localizzate, nè per mezzo di cadute successive, ma per mezzo dell'energia che essi ricavano da questi movimenti interni dell'aria. Il Soreau cerca di precisare queste idee. Secondo lui non basta spiegare queste raffiche, attribuendole alle accidentalità del suolo; esse ricavano soprattutto la loro forza dall'energia solare stessa, nascendo per causa dell'interposizione delle nuvole, mentre l'irregolarità della riflessione e dell'assorbimento del calore seguono lo stato atmosferico e la natura della superficie scaldata.

Tutte queste ragioni contribuiscono a produrre delle correnti discontinue presso alla superficie d'un suolo accidentato.

Ma che si produce nelle regioni elevate, senza nuvole, al disopra delle vaste estensioni dei deserti e degli oceani? Bisogna allora ammettere l'esistenza di correnti perfettamente uniformi?

Sarebbe strano che l'aria, questo fluido così compressibile, così mobile, così sensibile a tutti gli scuotimenti esteriori, acquistasse tanta coesione nei suoi spostamenti, e che sfuggisse alle leggi che governano i corpi molto più rigidi e densi.

Le molecole di una corda tesa, di un blocco di metallo, gli atomi dell'etere imponderabile vibrano sotto l'azione di un urto e partecipano a questa legge meravigliosa che sembra universale: la legge delle onde vibratorie. Perchè l'aria sarebbe esente da questo lavoro interno che è divenuto una nozione così comune della fisica attuale?

Ispirandosi a queste leggi di generalizzazione, il Soreau attribuisce alle correnti aeree delle pulsazioni relativamente indipendenti dalla loro velocità uniforme; ogni piccola massa d'aria avrebbe un movimento vibratorio periodico dV nel tempo e nello spazio, attorno

ad una posizione d'equilibrio relativa, mentre essa stessa è trascinata colla velocità V del vento. Egli rappresenta queste pulsazioni per mezzo di una sinussoide o per mezzo di una formola simile a quelle delle vibrazioni longitudinali delle corde in acustica:

$$dV = f\,(V)\,\text{sen}\,2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right).$$

Queste pulsazioni, irregolari presso il suolo, si regolarizzano nelle regioni ove gli uccelli le utilizzano. E per mezzo di un vento medio, dove esse non sono nè troppo forti nè troppo deboli, si può ammettere che l'istinto dell'uccello orienti convenientemente la sua superficie alare, quando riceve le pulsazioni che aumentano l'effetto sostentatore: la sua velocità propria diminuisce in questa prima fase; poi quando le pulsazioni cambiano di segno, esso modifica questo orientamento e si lascia scivolare secondo la corrente in modo da riguadagnare una velocità propria che esso può conservare senza perdere in altezza. Noi non conosciamo ancora queste pulsazioni in modo da poterle utilizzare per muoverci come gli uccelli.

Ma queste pulsazioni, insignificanti per gli areostati durante i tempi calmi, interessano singolarmente la loro stabilità, come lo vedremo più tardi, quando esse raggiungono la violenza delle raffiche e dei salti di vento.

La condizione assoluta d'una direzione completa in tutti i sensi è che la velocità propria del pallone dirigibile sia superiore a quella del vento: e il pallone sarà tanto più spesso dirigibile in tutti gli azimut, quanto più la sua velocità propria sarà grande.

Questi semplici ragionamenti ci conducono dunque a mettere sui nostri palloni dei motori abbastanza potenti per dare loro una grande velocità propria e sufficientemente leggeri per non aumentare oltre misura il volume del gas. Giacchè più è grande il pallone, più si accrescono le resistenze passive che esso incontra nell'atmosfera.

Occorre studiare queste resistenze passive per cercare di ridurle. Ma è un problema assai delicato giacchè suppone la conoscenza delle leggi della resistenza dell'aria sulla quale si è poco fondati, come vedremo.

§ 4. — *Spostamento ortogonale d'un piano sottile.* — Lo studio ella resistenza dell'aria interessa al più alto grado i costruttori degli pparecchi in cui si cerca di evitarla per aumentare la loro velocità i propulsione.

Nella areonautica ne troveremo una duplice applicazione: nella ostruzione razionale della forma del pallone e nella forma ottima a dare alle pale delle eliche.

Sfortunatamente lo stato attuale delle conoscenze areodinaiiche non permette di stabilire la teoria matematica di questi enomeni; il metodo sperimentale non ha condotto ancora a risultati ompleti e sicuri; e d'altra parte, l'aria non ha coll'acqua somiglianze anto intime perchè si possa stabilire una teoria unica di questi due uidi. Ci dobbiamo quindi limitare a passare in rivista le principali ɔrmole e le ipotesi spesso ingegnose che si sono emesse sullo spotamento rettilineo d'un piano sottile normale alla corrente aerea elativa, quindi sugli spostamenti obliqui, ancora più delicati e oggetti a controversie.

Il caso particolare dello spostamento ortogonale si è espresso ıediante la formola semplice ma poco esatta di Newton. La resitenza sarebbe proporzionale al quadrato della velocità, alla supercie esposta, al peso specifico del fluido; il coefficiente di moltiplicaione sarebbe costante.

Poncelet ha dato una dimostrazione della stessa formola; ma tudiando più da vicino il fenomeno si conclude subito che questa egge non è rigorosamente esatta.

Consideriamo da principio in una corrente animata da una veloità uniforme, un disco circolare normale alla direzione di questa orrente. L'aria non è disturbata che all'interno di un cilindro il cui sse passa per il centro del disco e i cui filetti esterni restano paralleli all'asse; i filetti interni deviano da una parte e dall'altra in corispondenza del disco, per riprendere quindi le loro distanze. Una eggera compressione si produce tra i bordi del disco e la superficie sterna del cilindro. Sul davanti si trova quindi imprigionata una erta massa d'aria che trasmette al disco la pressione dovuta allo trozzamento dei filetti deviati; essa è agitata da vortici i cui effetti linamici intervengono nel valore della resistenza.

Nella parte posteriore, per empire il vuoto prodotto dallo scar-

tamento dei filetti, si ha un richiamo d'aria che scarica parzialmente questa faccia, ciò che contribuisce ad aumentare la pressione totale; ma ivi si formano ancora dei vortici la cui influenza non è affatto trascurabile. Questa poppa fluida si vede nettamente nella scia di una nave, e la coda di schiuma trascinata al suo seguito mette i vortici in evidenza.

Ora studieremo l'influenza della velocità e della superficie del disco, facendo variare successivamente ciascuno di questi elementi.

Supponiamo da principio che la velocità della corrente aumenti. Il cilindro che ha il disco per base aumenterà, e così la pressione sul davanti: noi possiamo supporre questa pressione proporzionale al quadrato della velocità; ma non può essere la stessa cosa per la depressione posteriore composta di due termini principali di effetto contrario, l'uno dovuto alla rarefazione, l'altro dovuto alla forza viva delle molecole che si precipitano nell'aria rarefatta.

Se si scrive che la resistenza varia come l'espressione $K\ V^2 f(V)$, non si trova per la curva $y=f(V)$ una retta parallela all'asse dell'ascisse: ma la curva mostra che si può ammettere la legge del quadrato della velocità al di quà di 80 metri e al di là di 600 metri, scegliendo per K dei valori differenti.

Se si raddoppia il raggio del disco, ossia se quadruplichiamo la sua superficie, la resistenza si quadruplica? Niente ci autorizza a dirlo, poichè noi ignoriamo la legge di deformazione dei filetti fluidi. e noi non possiamo parimenti affermare che il raggio del cilindro sia raddoppiato.

Anche la legge della proporzionalità della resistenza dell'aria alla superficie non è che approssimata. Qualcuno ha cercato di correggerla, elevando, nella formola, S ad una potenza frazionaria come 1,1; altri hanno voluto mettere in rilievo l'importanza della forma della superficie, e parimenti, per una superficie data, del rapporto fra questa superficie e la velocità: perciò il Goupil si è fermato alla formola:

$$R = K d S V \sqrt{V^2 + S}\ .$$

Tutti questi tentativi di correzione hanno avuto lo stesso insuccesso. La vera legge è troppo complessa senza dubbio, per essere rappresentata da una formola unica, con dei coefficienti costanti e

indipendenti dalla forma e dalla natura della superficie; è molto meglio contentarsi di formole approssimate che si correggono coll'aiuto di coefficienti determinati dalla esperienza. È perciò che i diversi esperimentatori, partendo dalla formola di Newton $R = K d S V^2$ hanno cercato i valori Kd, e non bisogna stupirsi che essi abbiano ottenuto i numeri più diversi. Il coefficiente 0,085, trovato da Piobert, Morin, Renard, Langley, è presentemente il più generalmente ammesso, e la resistenza dell'aria su di un piano sottile ortogonale, alla temperatura di 0 gradi e alla pressione di 760 mm., è allora rappresentata approssimativamente dalla formola

$$R = 0{,}085\, SV^2.$$

§ 5. — *Formole di Newton e di Borda.* — Se il caso semplice dello spostamento ortogonale si presta a discussioni, risulta ancora più difficile la scelta della formola rappresentante approssimativamente il fenomeno dello spostamento obliquo. Le resistenze all'avanzamento R sono qui sostituite dalle pressioni totali che si suppongono normali al piano.

Si abbia una superficie AB che fa un angolo i col vento relativo V; chiamiamo N_i la pressione dell'aria su questa superficie. Si è da principio ammessa la legge detta del quadrato del seno

$$N_i = N_{90} \, . \, \text{sen}^2 i \, .$$

Ma le esperienze non la confermano. La esperienza ha dimostrato che, per piccole inclinazioni, la pressione cresce piuttosto proporzionalmente al semplice seno. Il colonnello di artiglieria Duchemin ha dato, più di sessant'anni fa, la formola:

$$N_i = K d \, SV^2 \, \frac{2 \, \text{sen} \, i}{1 + \text{sen}^2 i}$$

che, per i piccolissimo, si riduce sensibilmente a

$$N_i = 2K \, . \, d \, SV \, \text{sen} \, i \, ,$$

con un coefficiente $2K$ doppio di quello relativo al movimento ortogonale.

Vi sono anche altre formole, ma esse commettono l'errore di supporre indifferente la posizione della superficie rispetto alla dire-

zione del suo movimento. E tuttavia delle esperienze elementari, eseguite con un rettangolo allungato e ripetute in grande numero da Langley, hanno dato risultati affatto differenti, a seconda che la corrente aerea era perpendicolare al grande o al piccolo lato, perchè la resistenza era più forte nella prima posizione, ossia la legge del seno semplice s'applicava meglio al primo caso e la legge del seno quadrato al secondo.

§ 6. — *Calcolo teorico delle resistenze all'avanzamento.* — Si è cercato di trovare per un solido di rivoluzione una formola analoga a quella dei piani, dove entrerebbero una potenza della velocità e la più grande sezione perpendicolare al movimento.

La prima idea che si presenta è quella di applicare un coefficiente numerico alla formola che dà la resistenza di un piano avente la stessa area della sezione maestra. Questo coefficiente di riduzione è abbastanza forte per i palloni sferici ma l'è molto meno per i palloni allungati, ciò che giustifica le forme che i costruttori danno ai dirigibili.

Dupuy de Lôme ha applicato il criterio del coefficiente di riduzione al calcolo della resistenza all'avanzamento del suo dirigibile, stimando separatamente quella che proverebbero le differenti parti. Egli aveva calcolato, per ciascuna di queste, la sezione massima perpendicolare all'asse del pallone, quindi la resistenza dello spostamento ortogonale di queste sezioni per la velocità costante di 2,22 metri al secondo che egli voleva raggiungere, aggiungendo alle resistenze ottenute un coefficiente di riduzione, scelto secondo la natura e la forma delle parti considerate. I risultati furono assai notevoli. Il pallone al quale in generale si attribuisce la maggior resistenza, non entra che per un terzo nella cifra totale; le corde della sospensione, al contrario, offrono una resistenza considerevole.

La navicella, il timone, tutte le parti infine della nave aerea entrano ugualmente per una parte nella resistenza all'avanzamento.

Il Colonnello Renard ha trovato per la resistenza totale del dirigibile « La France » il valore

$$R = 0{,}01685\, D^2\, V^2;$$

mentre che la resistenza del solo pallone, supposto perfettamente liscio

e rigido, avrebbe dovuto essere, secondo le esperienze dello stesso scienziato

$$R = 0{,}00223\, D^2 V^2 ,$$

ossia 7,5 volte minore.

§ 7. — *Allungamento del pallone; suoi limiti.* — Abbiamo detto che la diminuzione delle resistenze all'avanzamento è ottenuta dapprima per mezzo dell'allungamento del pallone nel senso della marcia. Occorre però fissare i limiti di questo allungamento e vedere se si debba fare simmetrico rispetto alla sezione maestra.

Indipendentemente dalle questioni di stabilità, che mostrano il pericolo di un allungamento esagerato e che noi studieremo più avanti, è facile dimostrare che non occorre superare un certo limite. La resistenza dell'aria si può decomporre in due parti, come l'ha ammesso Giffard, che la rappresentava colla formola

$$R = KSV^2 + h\,\Sigma\, V^2,$$

essendo S la superficie della sezione maestra e Σ quella del pallone; egli distingueva quindi la resistenza normale dell'aria incontrante l'ostacolo e l'attrito del fluido su questo ostacolo.

Ora supponiamo un disco la cui resistenza al movimento ortogonale sia R alla velocità V; muniamolo di una prua e di una poppa, di lunghezza l e kl. La prima parte della resistenza è una funzione $f(l)$ che decresce costantemente a partire da R quando l cresce a partire da zero. Ma l'attrito è una funzione $\varphi(l)$ che cresce con l e gli diventa proporzionale a partire da un certo allungamento.

Per una velocità e un rapporto determinato della prua alla poppa, esiste un allungamento che dà il minimo della resistenza. D'altra parte un grande allungamento ha l'inconveniente di diminuire molto la forza ascensionale rispetto alla superficie del pallone, di rendere più delicata la sospensione della navicella, d'aumentare l'effetto del minimo movimento di beccheggio, di richiedere un gran numero di funi di sospensioni per ripartire bene il peso sul pallone, e quindi di accrescere ciò che si cerca di diminuire dall'altro lato ossia la resistenza all'avanzamento.

In queste condizioni si comprende come vi sia interesse a non

raggiungere il valore l che dà la resistenza minima del pallone solo. Tra i dirigibili francesi l'allungamento, ossia il rapporto tra il grande asse e il diametro della sezione maestra varia fra 3 e 7.

§ 8. — *Dissimetria.* — Scopo della prua è di evitare che il fluido si scarti con brusco movimento evitando così i vortici che ne risultano: d'altra parte se il corpo fosse terminato con un piano, si formerebbe una aspirazione sulla faccia posteriore che aumenterebbe la compressione sul davanti; occorre riempire questo vuoto parziale creato dal passaggio della prua, e riempirlo con un solido di una grande lunghezza che si sagomi in certo qual modo secondo il solco del fluido nella parte posteriore. La poppa contribuirà a ritardare il movimento di ritorno dell'aria spostata, mentre che la prua l'ha uniformente accelerato sino al raggiungimento della sezione maestra; di modo che alla fine il fluido sarà stato scartato e messo al posto col minimo lavoro ossia colla minima resistenza. Infine la poppa può avere uno scopo più efficace; essa provoca una componente nel senso della marcia e ricupera così una parte del lavoro assorbito dalla prua.

Per tutte queste ragioni, e per ragioni di stabilità ancora più importanti, ogni corpo in movimento deve trasportare la parte più grossa sul davanti. Gli studi fatti dal laboratorio areodinamico della Brigata Specialisti, a simiglianza di quelli fatti dal Colonnello Renard, hanno portato la conseguenza che la sezione maestra deve essere collocata a 1/4 circa della lunghezza a partire dal davanti.

§ 9. — *Studio degli involucri dei dirigibili.* — Lasciando da parte lo studio delle carcasse metalliche dei palloni tipo Zeppelin, esaminiamo gli involucri di stoffa. In un areostato vi sono delle parti che lavorano alla trazione ed altre che lavorano alla compressione. Ciò che lavora alla compressione è il gas mentre che l'involucro è sottoposto alla estensione; questo spiega perchè con dei pezzi assai piccoli si possono sostenere sforzi considerevoli. Agli involucri di stoffa noi non possiamo chiedere che uno sforzo di tensione: e se in un punto qualunque essi subiscono una compressione, si piegano e si deformano. Tutte le forme non sono realizzabili in seguito alla tendenza alla espansione del gas, e si può dire che si avranno deformazioni tutte le volte che senza estensione di alcuna linea della superficie

l'involucro sarà suscettibile di un aumento di volume: l'ellissoide di rivoluzione appiattito si deforma a partire da un certo limite dell'appiattimento. Questo limite è dato dalla formola $d = a / \sqrt{2}$ dove a e d sono i due assi dell'ellisse meridiana.

Per valutare lo sforzo a cui è sottoposta una stoffa ci si appoggia ad un teorema fondamentale.

Se una superficie è sottomessa in ciascuno dei suoi punti ad una pressione normale, uniforme p, e se si proiettano sopra un asse le pressioni elementari che essa sopporta, la somma di queste proiezioni è uguale al prodotto della pressione per la proiezione della superficie sopra un piano normale all'asse. Per esempio in una sfera lo sforzo di rottura normale al piano d'un cerchio equatoriale è $\pi R^2 p$; esso si ripartisce su di una circonferenza $2 \pi R$, ciò che dà un valore della tensione uguale a $pR/2$ per unità di lunghezza.

In una superficie di rivoluzione è interessante il considerare la tensione longitudinale T_1 tangente al meridiano, e la tensione trasversale T_2, tangente al parallelo.

Valutiamo la forza di rottura, che tende a strappare la superficie secondo il parallelo MM'. A sinistra di questo parallelo si esercita una pressione risultante $\pi r^2 p$.

Le tensioni $T_1 ds$ su elementi di lunghezza ds proiettati sull'asse hanno una risultante

$$\int T_1 \, ds \cos \alpha = T_1 \cos \alpha \times 2 \pi r ;$$

uguagliando questi due valori dello sforzo

$$T_1 \cos \alpha \times 2 \pi r = \pi r^2 p$$

si deduce il valore

$$T_1 = \frac{pr}{2 \cos \alpha} = \frac{P \rho_1}{2},$$

dove ρ_1 è il raggio della sfera inscritta.

La tensione longitudinale T_1 è costante su uno stesso parallelo; al contrario la tensione trasversale T_2 perpendicolare al piano del meridiano varia in ogni punto di questo meridiano. Isoliamo la semizona $MNM'N'$ limitata tra i due semi paralleli infinitamente vicini MM', NN' e gli elementi meridiani MN, $M'N'$.

Proietteremo sopra un asse (z), perpendicolare al meridiano, il sistema delle forze in equilibrio, comprendente le due forze $-T_2 ds$, uguali alle loro proiezioni, la risultante delle pressioni dirette del gas sulla semi zona $2 pr\, dx$, infine la somma $-F$ delle componenti secondo z delle tensioni longitudinali lungo il semi parallelo MM', e la stessa somma $F+dF$ lungo il semi parallelo NN'; la risultante di queste due forze sarà dF, essa si valuta facilmente introducendo il valore delle tensioni longitudinali su un elemento di parallelo $r du$

$$t = \frac{pr^2}{2 \cos \alpha} du,$$

che si proietta dapprima sul piano del parallelo, poi sull'asse; si integra infine questa proiezione $t \text{ sen } \alpha \text{ sen } u$, per avere il valore di $F = pr^2 tg\, \alpha$, che occorrerà differenziare per ottenere:

$$dF = 2prtg^2 \alpha\, dx - \frac{pr^2}{\rho_2 \cos^3 \alpha} dx,$$

dove ρ_2 è il raggio di curvatura del meridiano.

La somma algebrica delle tre quantità $-2\, T_2 ds$, $2 prdx$, e dF, uguagliata a zero, permette di ricavare

$$T_2 = p\rho_1 \left(1 - \frac{\rho_1}{2 \rho_2}\right);$$

questa formula conduce a conchiudere che in un pallone allungato la tensione trasversale è più grande della tensione longitudinale $p\, \rho_1/2$.

§ 10. — *Il Ballonnet.* — Non servirebbe a niente il dare ad un pallone un profilo ottimo se non potessimo conservarlo, malgrado le perturbazioni occasionali. Occorre avere un pallone costantemente pieno ed una stoffa perfettamente tesa; la navigazione con pallone floscio se ammissibile in ascensione libera è impossibile con palloni dirigibili. Un vuoto parziale sul davanti produce delle tasche in seguito alla pressione dell'aria; queste tasche cambiano di posizione e di forma se si fa variare la velocità del propulsore, se si manovra il timone, se l'areostato sale o scende. La resistenza all'avanzamento aumenta; la direzione e sopratutto la stabilità sono compromesse.

Quando un pallone completamente gonfio a terra si alza, sotto lo sforzo della sua forza ascenzionale, sino alla sua prima zona di

navigazione, l'eccesso della pressione interna del gas su quella dell'atmosfera tende ad aumentare e la rigidità dell'involucro è assicurata; una valvola permette di mantenere costante e uguale a qualche mm. d'acqua questo eccesso di pressione interna. Non vi è quindi nulla da temere finchè l'areostato sale. Ma la minima causa che determina in seguito una rottura d'equilibrio fa discendere l'areostato attraverso degli strati d'aria, dove la pressione aumentando progressivamente diventa presto superiore a quella del gas. Il pallone allora si contrae restando pieno alla parte superiore mentre che la parte inferiore diviene floscia. Rimane dunque la necessità di mantenere al pallone la sua forma durante i periodi di discesa, e di introdurvi un volume di gas suscettibile di compensare la contrazione risultante dalla discesa. Ora siccome non si è ancora trovato un procedimento pratico per immagazzinare il gas gettato alla salita in un recipiente rigido e di volume costante, questa compensazione non può essere fatta che introducendo dell'aria nell'involucro del pallone. Ma non bisogna pensare di mescolare l'aria al gas leggero, giacchè si trasformerebbe questo gas combustibile, per sè stesso assai dannoso, in gas esplosivo. Occorre quindi separare la capacità contenente il gas, da quella dove si introduce l'aria, per mezzo di un involucro costituente il così detto *Ballonnet* ovvero *Palloncino compensatore.*

Qualunque sia il dispositivo dato al pallone, occorre che le sue dimensioni sieno sufficienti perchè, dopo essersi elevato ad una altezza determinata, possa essere mantenuto completamente gonfio sino all'atterraggio.

A questo scopo è necessario che il volume del gas contratto al livello del suolo sia superiore al volume al quale si trova ridotta la camera a idrogeno $V-v$, quando il ballonnet ad aria v è completamente gonfio. Se p è la pressione dell'aria alla altezza massima raggiunta, alla discesa, il gas che occupava il volume V, si contrae e occupa uno spazio V/n alla pressione np. Bisogna dunque che V/n raggiunga almeno $V-v$. Ora questo valore minimo corrisponde alla pressione P a terra; e per conseguenza non bisogna superare una altezza per la quale la pressione è

$$p = \left(1 - \frac{v}{V}\right) P.$$

Dupuy de Lôme, prendendo $v/V = 1/10$, non doveva superare l'altezza di 860 metri. Senza di che egli avrebbe avuta la discesa, da una certa altezza sino al suolo, attraverso una regione nella quale il pallone sarebbe stato floscio.

Non si deve esitare, tenendo conto dell'ufficio importantissimo del ballonnet a esagerare le sue dimensioni, e a non prenderlo mai inferiore ad 1/6 del volume totale.

In ogni caso quello che è indispensabile, è che la portata del ventilatore che invia l'aria nel ballonnet, sia sufficiente per compensare la contrazione del gas durante la discesa. La potenza del ventilatore deve quindi essere calcolata in conseguenza. Per un abbassamento di un metro, il volume del gas è diminuito di 1/8000 del suo valore; un pallone di 1500 metri cubi perderà dunque per ogni metro di discesa 0,190 metri cubi. Se noi ammettiamo che si tolleri in certi momenti una velocità di discesa di 3 metri al secondo, la contrazione sarà di 0,570 metri cubi. Il ventilatore dovrà essere capace di erogare almeno questa portata.

Un errore da evitarsi, è di mettere in azione il ventilatore per mezzo del motore dell'elica, poichè se questo si arresta durante una discesa, il ballonnet diventa irrisorio; è vero che è difficile di avere un piccolo motore ausiliario unicamente destinato a questo uso, tuttavia sarebbe preferibile per la sicurezza.

§ 11. — *Stabilità di un dirigibile.* — L'instabilità dei dirigibili consiste nella maggior parte in movimenti pendolari; queste vibrazioni periodiche che noi abbiamo trovate già negli spostamenti dell'atmosfera, in apparenza così irregolari, sono una forma troppo generale della trasmissione d'energia, per ridursi al solo dominio della fisica.

Studieremo successivamente i tre problemi della stabilità longitudinale o del beccheggio, della stabilità laterale o del rullio, e della stabilità di rotta o orizzontale.

Quattro forze principali intervengono; queste sono: il peso del dirigibile, la sua forza ascensionale, la forza propulsiva dell'elica e infine la resistenza dell'aria, considerata come la risultante di tutte le forze elementari agenti in ogni punto della superficie ed applicata in un centro di resistenza. Ecco le quattro forze che in una marcia normale dovrebbero farsi equilibrio a due a due, poichè le prime

sono verticali e le seconde orizzontali, ma che alla minima oscillazione variano in grandezza in proporzione e causano l'instabilità del sistema. A queste occorre aggiungere le coppie dovute ai piani e ai timoni.

§ 12. — *La dinamica del pallone dirigibile.* — Ora spiegheremo le diverse particolarità del movimento dei dirigibili sia nel piano verticale che nel piano orizzontale; ci renderemo un conto esatto dell'effetto dei timoni e delle superfici stabilizzatrici. Interessantissimi a questo riguardo sono gli studi recenti dell'Ufficiale francese Comandante Voyer e del Cap. Crocco della Brigata Specialisti del Genio Militare Italiano.

La dinamica del pallone dirigile è stata sbozzata fin dal 1904 dal Colonnello Carlo Renard in due celebri note dell'*Académie des Sciences*. Come vedremo, la teoria del Colonnello Renard, quantunque incompleta dal punto di vista teorico, dà tuttavia dei notevoli risultati pratici. Vediamola dunque.

La forma conveniente dell'involucro o della carena di un dirigibile, l'invariabilità di questa forma, la soppressione dei movimenti del gas nell'interno del pallone, la rigidità della sospensione, sono condizioni che è necessario realizzare nella costruzione dei dirigibili. Ma queste condizioni non sono sufficienti per avere piccoli angoli di beccheggio: per un dato pallone esse sono tanto meno sufficienti quanto più grande è la velocità propria del dirigibile. Il Colonnello Renard ha dato il nome di *velocità critica* di un dirigibile alla velocità per la quale il grande asse della carena diverrebbe verticale. Per determinare questa velocità critica, il Colonnello Renard ha impiegato il metodo detto del *tunnel.*

In un tubo orizzontale di grande sezione (tunnel), traversato da una corrente violenta d'aria, si colloca una carena fusiforme suscettibile di girare attorno ad un asse orizzontale e normale all'asse del tubo. Questa carena può essere equilibrata staticamente per mezzo di masse collocate al di fuori del tunnel. Un piatto di bilancia portante dei pesi, permette di produrre e di mantenere delle inclinazioni determinate. Se si sceglie come punto di sospensione della carena il centro di gravità del suo volume, si osservano i fenomeni seguenti:

1° Una carena fusiforme simmetrica sospesa intorno al suo centro di gravità è staticamente indifferente a due posizioni di equi-

librio instabile ed a due posizioni di equilibrio stabile. Le due prime corrispondono al caso in cui la corrente di aria relativa è parallela all'asse di rivoluzione; quanto alle due posizioni di equilibrio stabile, esse si riferiscono al caso in cui l'asse di rivoluzione è normale alla corrente d'aria.

2° Se si cerca di mantenere la carena in una posizione intermedia (asse di rivoluzione inclinato dell'angolo α sulla direzione della corrente d'aria), non lo si può fare che collocando un peso conveniente in uno dei piatti della bilancia a cui la carena è solidale. Si introduce così una *coppia raddrizzante* uguale al prodotto del peso per il braccio di leva all'estremità del quale agisce. La misura di questa coppia raddrizzante permette di conoscere la grandezza della *coppia rovesciante* dovuta all'azione della corrente d'aria. Questa coppia rovesciante C' è in generale della forma

$$C' = K V^2 f(\alpha) \,, \tag{1}$$

V indicando la velocità della corrente d'aria,

α essendo l'angolo che fa il grande asse della carena fusiforme colla direzione di questa corrente d'aria o coll'asse del tunnel,

K essendo una costante che dipende dalla forma della carena.

Per una carena della forma generale del pallone « La France »

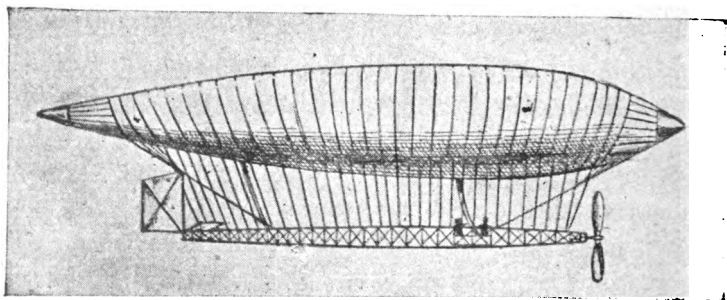



Fig. 45.

(fig. 45) il Colonnello Carlo Renard ha trovato che si poteva per piccoli valori di α, dare alla coppia rovesciante C' la forma

$$C' = 0{,}145 \operatorname{sen} \alpha \, a \, d^3 V^2 = A' V^2 \operatorname{sen} \alpha \,. \tag{2}$$

In questa formola C' è espresso in chilogrammetri,
a è il peso di un metro cubo d'aria in chilogrammi,
d è il diametro della sezione maestra della carena in metri,
V è la velocità del vento in metri al secondo.

Questi sono i risultati che dà il metodo del tunnel.

Egli fa allora il calcolo seguente che, come vedremo più tardi, è incompleto teoricamente.

Per un pallone dirigibile la cui carena è della forma generale del « La France », la *coppia raddrizzante* dovuta al peso sospeso al pallone, è, non tenendo conto delle deformazioni del pallone e della sospensione, sensibilmente rappresentata dalla formola

$$C = 1,73 \text{ sen } \alpha \; a d^4 = A \text{ sen } \alpha \,, \tag{3}$$

nella quale C è espresso in chilogrammetri.

Ammettiamo che il pallone non sia sottomesso che all'azione della coppia raddrizzante C e della coppia rovesciante C'. La *coppia di richiamo* del pallone ha per valore

$$C_1 = C - C' = (A - A' V^2) \text{ sen } \alpha \,; \tag{4}$$

ovvero ancora

$$C_1 = A \left(1 - \frac{A' V^2}{A}\right) \text{ sen } \alpha \,. \tag{5}$$

Per il Colonnello Renard, la grandezza di questa coppia di richiamo C_1, misura il grado di stabilità longitudinale del pallone.

Il dotto ufficiale dà al coefficiente

$$A = 1,73 \, a d^4$$

il nome di « coefficiente di stabilità al riposo » ed al coefficiente

$$A \left(1 - \frac{A'}{A} V^2\right) = 1,73 \, a d^4 \left(1 - \frac{0,145 \, a d^3 V^2}{1,73 \, a d^4}\right)$$

il nome di « coefficiente di stabilità in marcia ».

Per un dato pallone, questo ultimo coefficiente si annulla per un valore V_c della velocità V, tale che si abbia

$$1 - \frac{A'}{A} V_c^2 = 0 \,,$$

$$0,145 \, a d^3 \; V_c^2 = 1,73 \, a d^4 \,,$$

ovvero

$$V_c = 3{,}454 \sqrt{d} \quad . \tag{6}$$

Questo è il valore della velocità, che, per il Connello Renard, costituisce la ***velocità critica.***

La formola (6) mostra che per palloni simili la velocità critica cresce proporzionalmente alla radice quadrata del diametro della sezione trasversale.

Per esempio per il pallone « La France » (d = *m.* 8,40) questa velocità critica era uguale a 10 metri al secondo.

Per accrescere la velocità critica, si dà alla carena la forma di una freccia impennata. Si è visto più sopra che nel tunnel un corpo di rivoluzione simmetrico rispetto al piano della sezione maestra si sposta traversalmente, ponendosi l'asse orizzontale normale alla direzione della corrente d'aria prodotta dal ventilatore. Se si rende il corpo dissimmetrico sagomando una delle punte a coda cilindrica l'asse longitudinale si sposta, non più normalmente alla corrente d'aria, ma in una posizione obliqua e tanto più lontana dalla perpendicolare quanto più la coda è lunga. Infine se si aggiunge sulla coda un vero « empennage » la carena si raddrizza ancora di più.

Si vede dunque che i piani d'impennaggio introducono una coppia opposta alla coppia rovesciante e dello stesso segno della coppia raddrizzante.

Collochiamo nel tunnel un modello rappresentante una carena munita, dal lato della coda, di un piano d'impennaggio. Sia N la componente normale della resistenza dell'aria su questo piano; L la distanza del punto di applicazione di N dall'asse della sospensione della carena o dal suo centro di gravità. La coppia C'' dovuta alla resistenza dell'aria avrà l'espressione

$$C'' = NL . \tag{7}$$

La componente normale N si scrive, secondo i risultati delle esperienze del Colonnello Renard,

$$N = 1{,}6 \; Ka \; SV^2 \operatorname{sen} \alpha \; , \tag{8}$$

nella quale

$$K = 0{,}085 \; .$$

Si deduce quindi l'espressione della coppia C''

(9) $$C'' = 1{,}6\ \mathrm{K}a\ \mathrm{SLV}^2 \operatorname{sen} \alpha\,.$$

Poniamo

(10) $$\mathrm{E} = \mathrm{SL}\,.$$

È a questo momento superficiale che il Colonnello Renard ha dato il nome di « Empennage ». Si vede che questo impennaggio è una grandezza della natura di un volume.

Introducendo l'impennaggio E, la coppia C'' diviene

(11) $$C'' = 1{,}6\ \mathrm{K}a\ \mathrm{EV}^2 \operatorname{sen} \alpha\,.$$

Si può allora scrivere

(12) $$C'' = \mathrm{A}'' \operatorname{sen} \alpha\ \mathrm{V}^2\,,$$

ponendo

$$\mathrm{A}'' = 1{,}6\ \mathrm{K}a\ \mathrm{E}.$$

Applichiamo queste considerazioni ad un dirigibile portante una carena impennante.

La coppia raddrizzante C e la coppia rovesciante C', che abbiamo definita più sopra, si possono scrivere

(13) $$\mathrm{C} = \mathrm{A} \operatorname{sen} \alpha\,,$$

(14) $$\mathrm{C}' = \mathrm{A}' \operatorname{sen} \alpha\ \mathrm{V}^2.$$

La coppia di richiamo qui ha l'espressione

(15) $$\mathrm{C}_2 = \mathrm{C} + \mathrm{C}'' - \mathrm{C}' = (\mathrm{A} + \mathrm{A}''\mathrm{V}^2 - \mathrm{A}'\mathrm{V}^2) \operatorname{sen} \alpha\,,$$

(16) $$\mathrm{C}_2 = \mathrm{A}\left(1 - \frac{\mathrm{A}' - \mathrm{A}''}{\mathrm{A}}\,\mathrm{V}^2\right) \operatorname{sen} \alpha\,.$$

Il coefficiente di stabilità in marcia ha per espressione

$$\mathrm{A}\left(1 - \frac{\mathrm{A}' - \mathrm{A}''}{\mathrm{A}}\,\mathrm{V}^2\right).$$

Esso si annulla per un valore V_c della velocità V dato dalla relazione

$$1 - \frac{A' - A''}{A} V_c^2 = 0 \,,$$

ovvero

$$V_c = \sqrt{\frac{A}{A' - A''}} \,. \tag{17}$$

Il Colonnello Renard ammette che questo valore V_c rappresenti la velocità critica del pallone con carena impennata.

Si devono considerare diversi casi:

1° $A'' < A'$. *La coppia d'impennaggio è inferiore alla coppia rovesciante.* Esiste una velocità critica V_c data dalla relazione (17).

Il Colonnello Renard dice che in questo caso l'impennaggio è insufficiente. Si può scrivere la relazione (17) sotto la forma

$$V_c = \sqrt{\frac{A}{A'}} \cdot \sqrt{\frac{A'}{A' - A''}} = V_c' \sqrt{\frac{A'}{A' - A''}} .$$

Siccome il valore della velocità:

$$V_c' = \sqrt{\frac{A}{A'}}$$

rappresenta la velocità critica del pallone con carena non impennata, si vede che l'impennaggio ha per effetto di crescere la velocità critica senza impennaggio nel rapporto

$$\sqrt{\frac{A'}{A' - A''}} \,.$$

2° $A'' = A'$. *La coppia d'impennaggio è uguale alla coppia rovesciante.* La velocità critica V_c è infinita; il coefficiente di stabilità in marcia è uguale al coefficiente di stabilità in riposo.

In questo caso il Colonnello Renard dice che l'impennaggio è « strict ».

3° $A'' > A'$. *La coppia d'impennaggio è superiore alla coppia perturbatrice.*

La coppia

$$C'_1 = C' - C'' = (A' - A'') \operatorname{sen} \alpha \, V^2 \,,$$

che era una coppia rovesciante dell'asse del dirigibile nel caso in cui $A'' < A'$, diventa una coppia raddrizzante.

Il Colonnello Renard caratterizza questo caso dicendo che l'impennaggio è sovrabbondante.

Proponiamoci di calcolare il valore E dell'impennaggio « strict », caso in cui

$$A' = A'' \quad \text{e} \quad V_c = \infty .$$

Secondo quello che abbiamo detto sopra, il coefficiente A' ha la forma

$$A' = K' a d^3. \tag{18}$$

Il coefficiente K' avendo il valore 0,145 per carene del tipo del pallone « La France » raccorciato.

L'impennaggio « strict » è dunque dato dall'equazione

$$1{,}6\, K a\, E = K' a d^3 , \tag{19}$$

ovvero

$$E_s = \frac{K'}{1{,}6\, K} d^3 . \tag{20}$$

Per palloni simili, l'impennaggio « strict » cresce come il cubo del diametro della sezione maestra.

Se nell'equazione (20) si fa

$K' = 0{,}145$ (carene del tipo « La France » raccorciate)
$K = 0{,}085$

si trova

$$E = \frac{0{,}145}{1{,}6 \times 0{,}085} d^3 = 1{,}066 d^3. \tag{21}$$

Se la sezione maestra ha un diametro di 10 metri, l'impennaggio « strict » ha per valore 1066 metri cubi. Si può ottenerlo per mezzo di una penna di 38 metri quadrati di superficie alla punta posteriore del pallone e tale che il punto d'applicazione della componente normale della resistenza dell'aria sia a 1066/38 = 28 metri circa dietro al centro di gravità.

Ora l'esperienza verifica benissimo i risultati del calcolo.

I risultati del Colonnello Renard derivano da una prima teoria approssimativa. Il Cap. Crocco della Brigata Specialisti ha esami-

nato più da vicino la questione della stabilità dei dirigibili. È precisamente questa teoria che vedremo ora.

§ 13. — *Stabilità verticale di rotta, fermezza di rotta, stabilità orizzontale di rotta.* — Noi abbiamo sinora considerata la stabilità longitudinale, come la proprietà che possiede la nave aerea di conservare il suo asse orizzontale. Il Cap. Crocco indica questa proprietà sotto il nome di « fermezza di rotta ». Si chiama « stabilità d'altezza » la tendenza a non aumentare l'angolo dell'asse del pallone col piano orizzontale, allorchè questa inclinazione è stata prodotta sotto l'azione d'una causa esterna. Questa « stabilità d'altezza » viene indicata dal Soreau sotto il nome di « stabilità verticale di rotta »: adotteremo sempre questa denominazione.

Diremo dunque che una nave aerea presenta una « *stabilità verticale di rotta* » allorchè l'angolo che il suo asse fa col piano orizzontale non tende a crescere al di là di ogni limite, ma si avvicina al contrario al valore zero. La nave aerea possiede inoltre « *fermezza di rotta* » se l'angolo del suo asse col piano orizzontale resta vicino a zero, ossia, se questo asse resta, durante la rotta, sensibilmente orizzontale. Queste due proprietà, la stabilità verticale di rotta, e la fermezza di rotta, realizzano la « stabilità longitudinale » della nave aerea.

La stabilità verticale di rotta e la fermezza di rotta si riferiscono al movimento dell'asse della nave in un piano verticale. La « stabilità orizzontale di rotta » è relativa al movimento dell'asse della nave in un piano orizzontale: essa rappresenta la tendenza che ha l'angolo fatto dall'asse della nave aerea col piano verticale a non crescere al di là di ogni limite o a tendere verso un valore finito, tanto più piccolo quanto più grande è questa stabilità.

Queste definizioni erano necessarie prima di studiare il movimento di un dirigibile.

Faremo le seguenti ipotesi:

1º La forza ascensionale del pallone rimane costante durante la marcia, e ciò dentro i limiti d'altezza tra i quali naviga l'areostato.

2º La forma dell'areostato resta invariabile.

3º La velocità propria del pallone è costante.

4° Il centro di gravità del sistema è invariabile.

5° Gli angoli fatti dall'asse della carena, sia colla rotta che coll'orizzonte, sono abbastanza piccoli, perchè si possano sostituire con gli angoli i seni e le tangenti.

Determiniamo le coppie che agiscono sopra un pallone in marcia.

La resistenza che l'aria oppone all'avanzamento di un pallone fusiforme è diretta secondo l'asse di questo pallone, allorchè questo è parallelo alla velocità propria. Ma, allorchè l'asse longitudinale del pallone fa colla velocità propria un certo angolo, la resistenza all'avanzamento è obliqua rispetto all'asse longitudinale. Il Crocco decompone questa azione dell'aria in due forze: Una parallela all'asse della carena e alla quale egli riserva il nome di *resistenza*, l'altra perpendicolare all'asse e che egli chiama *pressione normale;* la componente assiale o resistenza, è opposta alla spinta dell'elica.

La resistenza che oppone l'aria all'avanzamento, dà luogo alla coppia rovesciante C' che abbiamo studiato precedentemente. Questa coppia rovesciante ha per espressione

$$C' = A' \operatorname{sen} \alpha \, V^2 = K' a d^3 \operatorname{sen} \alpha \, V^2,$$

il coefficiente K' dipendendo dalla forma della carena, α essendo l'angolo di deriva.

Se si sostituisce l'angolo al seno, si può scrivere questa coppia rovesciante dinamica

$$C' = A' \alpha V^2 ; \tag{22}$$

espressione nella quale il coefficiente A' è una grandezza della natura di una massa.

Studiando sperimentalmente i valori della pressione normale prodotta dalla resistenza all'avanzamento, il Capitano Crocco ha trovato che essa si poteva rappresentare per mezzo di una formola analoga alla formola (22). Se P' è questa pressione normale, si ha

$$P' = k' \alpha V^2 , \tag{23}$$

espressione nella quale il coefficente k' è una grandezza della natura di una densità lineare.

Indichiamo con l' la distanza del punto di applicazione di P' dal centro di gravità. Si ha

$$P' l' = k' l' \alpha V^2.$$

Ma d'altra parte si ha

$$P' l' = C'. \tag{24}$$

Si deduce

$$A' = k' l',$$

e quindi

$$C' = k' l' \alpha V^2 \tag{25}$$

In quanto alla resistenza R' misurata lungo l'asse della carena, essa ha per espressione

$$P' = R' tg\, \alpha \quad \text{o approssimativamente} \quad P' = R' \alpha. \tag{26}$$

Questa resistenza $R' = P'/\alpha$ è direttamente opposta alla spinta dell'elica. Le relazioni indicate sono applicabili sia nel caso in cui l'asse della carena è mobile in un piano verticale sia in quello in cui è mobile in un piano orizzontale. In questo caso, la coppia rovesciante dinamica C' non è equilibrata da nessuna coppia raddrizzante stabile.

Non avviene lo stesso nel piano verticale. La coppia raddrizzante C, studiata più sopra, esercita la sua azione. Questa coppia raddrizzante è formata dal peso e dalla forza ascensionale. Secondo le ipotesi enunciate sopra, questa coppia è costante: essa è formata da forze costanti i cui punti di applicazione (centro di gravità del sistema e centro di spinta della carena) sono fissi.

Questa coppia statica ha per espressione

$$C = m\gamma\, \theta\, \delta, \tag{27}$$

dove $m\gamma$ è il peso del sistema aereo,

δ è la distanza tra il centro di gravità del sistema e il centro di volume occupato dal gas,

θ è l'angolo compreso tra la verticale e la linea che unisce questi due centri; se questa linea è normale all'asse dell'areostato. θ sarà parimenti l'angolo dell'asse della carena coll'orizzonte.

Consideriamo un areostato che non sia animato da movimento i traslazione. Supponiamo che esso si metta a beccheggiare. Esso i comporta allora come un pendolo che si muove in un mezzo reistente; questo allora tende a spegnere più o meno rapidamente le scillazioni.

La coppia resistente dovuta al pallone è in questo caso proporionale al quadrato della velocità angolare del pallone. Se contiuiamo a chiamare θ l'angolo dell'asse della carena col piano rizzontale, la velocità angolare del pallone è uguale a $d\theta/dt$; la oppia resistente ha per espressione

$$C_r = B\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2. \tag{28}$$

Non bisogna confondere questa coppia resistente C_r colla còppia addrizzante dinamica C'' che abbiamo già definita. Questa non agisce he durante il movimento di traslazione dell'areostato per mezzo delle eazioni dell'aria sulle superfici d'impennaggio. La coppia resistente onsiderata qui agisce su tutto il pallone che beccheggia, anche uando la sua elica non è in movimento. Se consideriamo un tale allone (non animato da movimento di traslazione) a carena non npennata, l'equazione del suo movimento di beccheggio si ottiene acilmente notando che esso è unicamente sottomesso all'azione della oppia raddrizzante statica C e a quella della coppia resistente C_r pposta alla prima. Se I indica il momento d'inerzia del pallone inorno al suo asse orizzontale di rotazione, l'equazione del beccheggio i scrive

$$I = \frac{d^2\theta}{dt^2} - B\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 + m\gamma\theta\delta = 0. \tag{29}$$

Allorchè il pallone è animato da un movimento di traslazione i velocità propria V, l'azione della coppia resistente sussiste e si ovrappone a quella della coppia raddrizzante dinamica prodotta dai iani d'impennaggio.

Il Crocco ammette che, in questo caso, questa coppia resistente della forma

$$C_r = C_\rho \,.\, V \,.\, \frac{d\theta}{dt}. \tag{30}$$

È sotto questa forma che introduciamo la coppia resistente nell'equazione generale del beccheggio di un dirigibile.

La coppia raddrizzante dinamica dovuta all'azione dei piani d'impennaggio o piani di coda si scrive

$$C'' = A'' \alpha V^2. \tag{31}$$

Come lo indica la relazione (11), il coefficiente A'' è della forma

$$A'' = B_1 S L,$$

dove B_1 è una costante conveniente, che rappresenta una densità.

Diamo a questa coppia la forma (25) adottata per la coppia rovesciante C'.

Poniamo

$$k'' = B_1 S, \tag{32}$$

e troviamo

$$C'' = k'' L \alpha V^2. \tag{33}$$

Questa coppia agisce in senso inverso alla coppia C'. *La coppia totale rovesciante* ha dunque l'espressione:

$$C_1' = C' - C'' = (k' l' - k'' L) \alpha V^2. \tag{34}$$

Per analogia a quello che noi abbiamo detto per la coppia rovesciante C', si può dire che la coppia raddrizzante C'' è il prodotto di due fattori: uno dei fattori

$$P'' = k'' \alpha V^2 \tag{35}$$

rappresenta una pressione normale all'asse della carena; l'altro. il fattore L, è la distanza del punto di applicazione della pressione normale dal centro di gravità, distanza contata in senso inverso ad l'. *La pressione normale totale*, risultante della resistenza all'avanzamento e del raddrizzamento dovuto ai piani di coda, ha per espressione

$$P_1' = P' + P'' = (k' + k'') \alpha V^2. \tag{36}$$

Oltre alla coppia raddrizzante dinamica che non agisce che durante la traslazione dell'areostato, l'impennaggio introduce una coppia

resistente, che ha per effetto di spegnere le oscillazioni dell'areostato, anche quando questo non avanza sotto l'azione dell'elica.

Se B_2 indica un coefficiente costante conveniente, questa coppia è, secondo Crocco, della forma

$$C'_r = B_2 S L^2 V \frac{d\theta}{dt}.$$

Ammettiamo che i coefficienti B_2 e B_1 sieno identici: la coppia resistente diviene allora

$$(37) \qquad C'_r = k'' L^2 V \frac{d\theta}{dt}.$$

La coppia C'_r si aggiunge alla coppia C_r. La coppia resistente totale ha allora l'espressione

$$(38) \qquad C''_r = C_r + C'_r = (C_2 + k'' L^2) V \frac{d\theta}{dt}.$$

Si vede dunque che l'impennaggio ha per effetto

1° di diminuire la coppia rovesciante,
2° d'aumentare la pressione normale,
3° di aumentare la coppia resistente.

Tutto ciò che è stato detto sull'azione dei piani di coda si applica parimenti bene al caso in cui questi piani siano orizzontali (oscillazioni di beccheggio) che al caso in cui siano verticali (oscillazioni dell'areostato in un piano orizzontale).

Come abbiamo visto, i timoni sono, come i piani di coda, verticali o orizzontali. Essi comprendono i *timoni di rotta* (direzione dell'areostato) e i *timoni di altezza* (salita o discesa dell'areostato); questi timoni possono essere posti anteriormente (timoni di testa) ovvero posteriormente (timoni di coda).

Sia L_1 la distanza del centro geometrico dei timoni dal centro di gravità dell'areostato. Questa distanza ha il segno + per i timoni di testa e il segno — per i timoni di coda.

Sia k_1'' un coefficiente analogo a k e B un coefficiente analogo a B_2.

Sia inoltre ψ l'angolo che questi timoni fanno coll'asse dell'areostato, angolo che il pilota può far variare a suo grado. Se $\psi = 0$, i timoni agiscono come i piani di coda.

Essi introducono

Una coppia raddrizzante: $\pm k_1'' L_1 \alpha V^2$

Una pressione normale: $k_1 \alpha V^2$

Una coppia resistente: $k''_1 L^2_1 V \frac{d\theta}{dt}$.

La coppia totale raddrizzante, la pressione totale normale e la coppia normale resistente, sono allora tenendo conto di queste influenze dei timoni (caso in cui $\psi = 0$)

$$C'_2 = (k'l' - k''L \pm k_1'' L_1) \alpha V^2 = C_l \alpha V^2 \tag{39}$$

$$P'_2 = (k' + k'' + k_1'') \alpha V^2 = X \alpha V^2 \tag{40}$$

$$C_r''' = (C_\rho + k'' L^2 + k_1'' L_1^2) V \frac{d\theta}{dt} = \Gamma_r V \frac{d\theta}{dt}. \tag{41}$$

Allorchè i timoni fanno coll'asse della carena un angolo ψ differente da zero, essi producono una coppia di rovesciamento e una pressione normale che sono funzioni dell'angolo ψ. Se questo angolo ψ è piccolo, si può ammettere che la coppia di rovesciamento ha per espressione

$$\mp k_1'' L_1 \psi V^2$$

(+ per i timoni di testa, — per i timoni di coda).

E che la pressione normale è:

$$k_1'' \psi V^2.$$

In seguito all'analisi fatta, le azioni dell'aria sull'areostato completo, ossia munito di piani di coda e dei timoni, si riducono alle tre forze o coppie seguenti

$$\left\{\begin{array}{l} \text{Coppia rovesciante} = C_l \alpha V^2 \pm k_1'' L_1 \psi V^2 \\ \text{Pressione normale} = X \alpha V^2 + k_1'' \psi V^2 \\ \text{Coppia resistente} = \Gamma_r V \frac{d\theta}{dt}, \end{array}\right. \tag{42}$$

espressioni nelle quali si ha

$$\left\{\begin{array}{l} C_l = k'l' - k''L \pm k_1'' L_1 \text{ (grandezza della natura di una massa)} \\ X = k' + k'' + k_1'' \text{ (grandezza della natura d'una densità lineare)} \\ \Gamma_r = C_\rho + k'' L^2 + k_1'' L_1^2 \text{ (grandezza della natura di un prodotto massa per lunghezza).} \end{array}\right. \tag{43}$$

Gli elementi caratteristici della nave aerea sono dunque i seguenti:

(44) $\left\{ \begin{array}{l} \text{Elementi caratteristici della carena: } k',\ k'l',\ C_p \\ \text{Elementi caratteristici dell'impennaggio: } k'',\ L \\ \text{Elementi caratteristici dei timoni: } k_1'',\ L_1. \end{array} \right.$

La conoscenza di questi elementi caratteristici e di tutto il loro insieme è necessaria per lo studio completo della stabilità e del pilotaggio della nave aerea.

§ 14. — *Determinazioni sperimentali.* — La determinazione di questi elementi caratteristici (dell'involucro, dell'impennaggio, dei timoni) è fatta esperimentalmente nei laboratori della Brigata Specialisti nella maniera seguente.

In un bacino (lunghezza 180 metri, larghezza 3 metri, profondità 2,50) pieno di acqua (fig. 46), si fa muovere un modello del

Fig. 46.

pallone in scala ridotta. Questo modello è portato da un piccolo carrello; e il carrello è collocato sopra un carro mobile messo in moto da un motore elettrico e scorrente sopra rotaie disposte parallelamente alla vasca. Il carrello, che ha piccolissimi attriti, è mobile a volontà, sia nel senso longitudinale che nel senso trasversale; i suoi spostamenti sono limitati da molle che misurano le forze messe in

giuoco. Dei cronografi e dei tachigrafi permettono di misurare la velocità del carro.

Con questi apparecchi, è facile misurare la *resistenza longitudinale* e la *pressione normale* all'asse della carena. Per studiare la *coppia rovesciante*, si lascia il modello libero di girare in un piano orizzontale attorno ad un asse verticale passante per il suo centro di gravità. Si mantiene la deviazione angolare per mezzo di una molla d'equilibrio che misura la coppia rovesciante.

Siano

C'_1 il valore di questa coppia;

d_1 il diametro della sezione maestra del modello;

V_1 la velocità del modello;

α l'angolo dell'asse del modello colla velocità o angolo di deriva;

a_1 il peso dell'unità di volume d'acqua;

K' un coefficiente che dipende unicamente dalla forma della carena.

Secondo le ricerche del Colonnello Renard, si ha per la coppia di rovesciamento C'_1

$$C'_1 = K' a_1 d_1^3 \alpha V_1^2 . \tag{45}$$

Si abbia inoltre un dirigibile simile al modello, immerso però in un mezzo di peso specifico a; il diametro della sua sezione maestra sia uguale a d, e sia V la velocità colla quale esso si muove.

La coppia rovesciante di questo dirigibile, per uno stesso valore dell'angolo di deriva, ha per espressione

$$C' = K' a d^3 \alpha V^2 . \tag{46}$$

Dividendo le due equazioni a membro, si ha

$$\frac{C'}{C'_1} = \frac{a}{a_1} \left(\frac{d}{d_1}\right)^3 \left(\frac{V}{V_1}\right)^2 . \tag{47}$$

Se sul modello si è determinato C'_1 per una velocità V_1 questa relazione permette di avere il valore della coppia rovesciante per la velocità V del dirigibile.

Ora dalla relazione (25) la coppia rovesciante C' ha per espressione

$$C' = k' \, l' \, \alpha \, V^2 . \tag{25}$$

La conoscenza di C', dell'angolo α (angolo sotto il quale è stata fatta l'esperienza nell'acqua), della velocità V, permette di calcolare $k' \, l'$. Le esperienze sui modelli permettono di avere analogamente la pressione P' e quindi k' dalla relazione (23).

Facciamo l'esempio. In una esperienza si aveva:

Angolo di deriva $12^0,30$ $\qquad \alpha = 0,25$

$V_1 = 1,60$ metri al secondo $\qquad C'_1 = 1,320$ kilogrammetri

$$\frac{d}{d_1} = 40,1 \qquad \frac{a}{a_1} = \frac{1,25}{1000} = \frac{1}{800}$$

$$C' = 1,320 \, \frac{1}{800} \, (40,1)^3 \left(\frac{V}{1,60}\right)^2 .$$

Se il dirigibile ha una velocità di 10,15 metri al secondo si trova

$$C' = 1,320 \, \frac{1}{800} \, (40,1)^3 \left(\frac{10,15}{1,60}\right)^2$$

$$C' = 4200 \text{ kilogrammetri.}$$

Sostituendo i valori nella (25) si deduce

$$4200 = k' \, l' \, 0,25 \times \overline{10,15}^2$$

$$k' \, l' = 163,1 .$$

Le esperienze sono state fatte alla Brigata specialisti sopra un modello ottenuto facendo ruotare attorno alla corda l'arco di una sinusoide corrispondente alla equazione

$$y = 44,6 \text{ sen } 4x . \tag{48}$$

Il solido ottenuto è simile all'involucro del dirigibile militare italiano N. 1 (fig. 47).

Vedremo che il dirigibile N. 1-*bis* ha la poppa leggermente ingrossata.

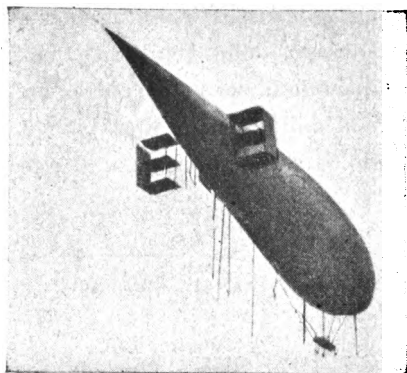



Fig. 47.

I risultati ottenuti per il pallone, senza piani di coda, sono in media i seguenti

$$\left\{\begin{array}{l} k' = 0{,}076\, d^2 \\ l' = 1{,}91\, d \\ k'l' = 0{,}145\, d^3 \quad d = \text{diametro della sezione maestra del pallone} \\ v \text{ (volume del pallone)} = 2{,}36\, d^3. \end{array}\right.$$

Per un volume di 2500 metri cubi (dirigibile militare N. 1) si deduce, essendo $d = 10{,}20$ metri

$$\left\{\begin{array}{l} k' = 0{,}076 \times \overline{10{,}20}^2 = 8{,}36 \\ l' = 1{,}91 \times 10{,}20 = 19{,}50 \text{ metri} \\ k'l' = 0{,}145 \times \overline{10{.}20}^3 = 163. \end{array}\right.$$

Il metodo della oscillazioni in una corrente d'aria prodotta da un potente ventilatore permette di determinare sopra un modello i coefficienti C_l e Γ_r (vedi formola 43).

Consideriamo il modello suscettibile di girare attorno ad un asse orizzontale passante per il suo centro di gravità. Sia V la ve-

locità della corrente d'aria e $p\,\delta$ una coppia raddrizzante opposta alla coppia rovesciante prodotta dalla corrente d'aria. Facciamo oscillare il modello.

Sia, ad un certo istante, θ l'angolo che fa l'asse del modello colla direzione della corrente d'aria.

Il modello è sottoposto alle seguenti azioni

1° Coppia raddrizzante: $p\,\delta$ sen θ ovvero $p\,\delta\,\theta$, se l'angolo è piccolo;

2° Coppia resistente: $\Gamma_r \, . \, V \, . \, \frac{d\,\theta}{d\,t}$ dello stesso segno della coppia raddrizzante;

3° Coppia rovesciante: $C\,V^2\,\theta$ opposta alle precedenti.

Se J indica il momento d'inerzia del modello attorno al suo asse di sospensione, l'equazione del movimento d'oscillazione del modello è

$$J\,\frac{d^2\theta}{d\,t^2} + \Gamma_r \, . \, \mathrm{V} \, . \, \frac{d\,\theta}{d\,t} + (p\,\delta - \mathrm{C}_l\,\mathrm{V}^2)\,\theta = 0\,. \tag{49}$$

L'equazione caratteristica di questa equazione differenziale di secondo ordine è

$$x^2 + \frac{\Gamma_r\,.\,\mathrm{V}}{J}\,x + \frac{p\,\delta - \mathrm{C}_l\,\mathrm{V}^2}{J} = 0\,. \tag{50}$$

Consideriamo il caso in cui le oscillazioni del modello siano periodiche. L'equazione (50) ha le sue radici immaginarie. L'integrale generale dell'equazione (49) è

$$\theta = e^{\lambda t}\,[\mathrm{M} \cos \mu\,t + \mathrm{N} \,\mathrm{sen}\, \mu\,t]\,, \tag{51}$$

nella quale

$$\lambda = -\frac{\Gamma_r\,.\,\mathrm{V}}{2\,J} \qquad \mu = \sqrt{\frac{p\,\delta - \mathrm{C}_l\,\mathrm{V}^2}{J} - \lambda^2}\,. \tag{52}$$

Se nell'istante $t = 0$, $\theta = \theta_0$ e se $\left(\frac{d\,\theta}{d\,t}\right)_0 = 0$, l'equazione (51) diviene

$$\theta = \theta_0\, e^{\lambda t} \left(\cos \mu\,t - \frac{\lambda}{\mu}\,\mathrm{sen}\, \mu\,t\right). \tag{53}$$

Sia

$$T = \frac{2\pi}{\mu} \tag{54}$$

il periodo del movimento; sostituendo nell'espressione di θ i tempi $0, T, 2T, \ldots\ldots nT$, si trova per i valori corrispondenti di θ,

$$\begin{aligned}
\theta_0 &= \theta_0 \\
\theta_1 &= \theta_0\, e^{\lambda T} \\
\theta_2 &= \theta_0\, e^{2\lambda T} \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots \\
\theta_n &= \theta_0\, e^{n\lambda T}.
\end{aligned}$$

Si deduce di qui

$$\text{Log. nep.}\ \frac{\theta_n}{\theta_0} = n\lambda T; \tag{55}$$

θ_0, θ_n e T sono dati dall'osservazione di $(n+1)$ oscillazioni, Dalle relazioni (54) e (55) viene

$$\left\{\begin{aligned}
\lambda &= \frac{\text{Log. nep. } \theta_n - \text{Log. nep. } \theta_0}{n T} \\
\mu &= \frac{2\pi}{T};
\end{aligned}\right. \tag{56}$$

e quindi

$$\Gamma_r = \frac{2J}{V} \cdot \frac{\text{Log. nep. } \theta_0 - \text{Log. nep. } \theta_n}{n T} \tag{57}$$

$$C_l = \frac{p\delta - J(\lambda^2 + \mu^2)}{V^2}. \tag{58}$$

Occorre conoscere $p\,\delta$, V e J. p e δ si misurano per mezzo della bilancia e del metro; V si determina per mezzo di convenienti apparecchi manometrici.

Il momento d'inerzia J dell'apparecchio ha per espressione

$$J = J_0 \text{ (relativo al modello) } + \frac{p\,\delta^2}{g}. \tag{59}$$

Riguardo a J_0, lo si determina per mezzo di una esperienza d'oscillazione senza corrente d'aria, per mezzo di una coppia raddrizzante conveniente $p_1\,\delta_1$.

Siccome non vi è corrente d'aria, il modello è sottomesso ad una coppia resistente

$$C_r = B\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 ; \tag{28}$$

diamo a questa coppia resistente la forma approssimata

$$C\left(\frac{d\theta}{dt}\right).$$

L'equazione del movimento è allora

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + C\frac{d\theta}{dt} + p_1\delta_1\theta = 0. \tag{60}$$

L'integrale generale di questa equazione è

$$\theta = \theta'_0 e^{\lambda' t}\left(\cos\mu' t - \frac{\lambda'}{\mu}\operatorname{sen}\mu' t\right), \tag{61}$$

nella quale

$$\left\{\begin{aligned} \lambda' &= -\frac{C}{2J} = \frac{\text{Log. nep. } \theta'_n - \text{Log. nep. } \theta'_0}{n' T} \\ \mu' &= \sqrt{\frac{p_1\delta_1}{J} - \lambda'^2} = \frac{2\pi}{T'} ; \end{aligned}\right. \tag{62}$$

θ'_0, θ'_n, T', n' avendo significati analoghi a quelli che noi abbiamo dato prima a θ_0, θ_n, T, n.

Da queste relazioni si deduce

$$\frac{p_1 d_1}{J} = \frac{4\pi^2}{T'^2} + \lambda'^2 ; \tag{63}$$

facciamo una seconda esperienza modificando $p_1 d_1$ e lasciando J costante (dividendo per esempio p_1, disponendo due pesi $\frac{p'}{4}$ su due bracci orizzontali di una lunghezza uguale a $\delta_1\sqrt{2}$) noi troviamo

$$\frac{p_1' d_1'}{J} = \frac{4\pi^2}{T_1'^2} + \lambda'^2 \left(\text{quì per es. si ha: } p_1'\delta_1' = p_1\delta_1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \tag{64}$$

dalla quale eliminando λ'^2

$$\frac{1}{J}(p_1\delta_1 - p_1'\delta_1') = 4\pi^2\left(\frac{1}{T'^2} - \frac{1}{T_1'^2}\right). \tag{65}$$

Di là si ricava J e quindi J_0.

Tale è il principio del metodo delle oscillazioni nell'aria, che dà Γ_r e C_l.

Ora si ha

$$(43)\qquad \begin{cases} \Gamma_r = C_l + k'' L^2 + k_1'' L_1^2 \\ C_l = k'l' - k'' L \pm k_1'' L_1. \end{cases}$$

Se l'involucro non è impennato i metodi precedenti danno direttamente C_ρ e $k'l'$. Noi abbiamo visto prima il risultato ottenuto per $k'l'$ colla forma di carena che abbiamo definita. Il valore di C_ρ non è stato determinato con grande precisione; si è preso un valore medio uguale a 500.

Per k'' e k_1'', si è preso in valore

$k'' = 1{,}6\, K_0\, a\, S$ S superficie dei piani di coda

$k_1'' = 1{,}6\, K_0\, a\, S_1$ S_1 superficie dei timoni

ovvero

$$(66)\qquad k_1'' = 1{,}6 \times 0{,}085 \times 1{,}25\, S = 0{,}17\, S \text{ (} S \text{ in metri quadrati)}$$

valore ridotto dalla formula (11) indicata dal colonnello Renard.

Con una prima approssimazione, non si considerano che i piani d'impennaggio, e si scrive

$$(67)\qquad \begin{cases} \Gamma_r = C_\rho + k'' L^2 \\ X = k' + k'' \\ C_l = k' l' - k'' L. \end{cases}$$

Per il dirigibile simile al modello descritto più sopra, si ha

$$(68)\qquad L = 2{,}55\, d \qquad d \text{ diametro della sezione maestra}$$

per questo dirigibile si ha dunque

$$\begin{cases} \Gamma_r = 500 + 0{,}17\, S \times \overline{2{,}55}^2 \times d^2 \\ X = 0{,}076\, d^2 + 0{,}17\, S \\ C_l = 0{,}145\, d^3 - 0{,}17\, S \times 2{,}55 \times d, \end{cases}$$

ovvero sia

$$(69)\qquad \begin{cases} \Gamma_r = 500 + 1.1\, d^2 \times S \\ X = 0{,}076\, d^2 + 0{,}17\, S \\ C_l = 0{,}145\, d^3 - 0{,}434\, d \times S. \end{cases}$$

Per il dirigibile di 2500 metri cubi

$$d = 10{,}20 \text{ metri}$$

queste formole divengono

$$(70) \quad \begin{cases} \Gamma_r = 500 + 141{,}45\,S \\ X = 8{,}36 + 0{,}17\,S \qquad S \text{ metri quadrati} \\ C_l = 163 - 4{,}43\,S. \end{cases}$$

Tali sono le formole approssimate che servono di base nello studio della dinamica dei dirigibili.

Per una maggior indagine e un più profondo esame della dinamica del dirigibile rimandiamo all'opera del Cap. Crocco: *La dinamica degli aerostati dirigibili.* Essa tratta del movimento del pallone in un piano verticale quindi stabilisce le equazioni degli effetti dei piani orizzontali; poi impianta le equazioni del movimento in un piano orizzontale e studia gli effetti dei timoni verticali.

§ 15. — *Propulsione del dirigibile - L'elica aerea.* — Si è visto che un pallone non merita il nome di dirigibile che quando esso possiede una velocità propria superiore alla velocità media del vento nella regione in cui si trova. Si comprende dunque che la questione della propulsione, sia dal punto di vista dell'organo propulsore stesso che dal punto di vista del motore che deve metterlo in movimento, è d'una importanza capitale. Finora si è ritenuto l'elica come il più semplice e il migliore dei propulsori destinati ad agire in un fluido nel quale sono completamente immersi.

Sfortunatamente, la teoria è a questo riguardo ancora imperfetta, e se ne comprenderà facilmente la ragione se si riflette un istante alle difficoltà particolari che presenta il problema. Noi siamo infatti nell'ignoranza più completa circa le leggi della resistenza che presenta l'aria al movimento di una superficie. Noi non conosciamo queste leggi con qualche certezza che nel caso particolarissimo di un piano sottile che si sposta ortogonalmente: ma se si tratta di un elemento piano che fa un certo angolo colla direzione del suo spostamento, ci si trova subito in presenza di formole assai numerose e totalmente differenti. Vi è ancora di più: anche se si trovasse la legge elementare del fenomeno ossia l'espressione della

resistenza dell'aria sopra una superficie infinitamente piccola, non si potrebbe estenderla per integrazione ad una superficie finita senza esporsi a gravi errori.

Perciò, dato la stato primordiale delle nostre conoscenze sulla dinamica dei fluidi si può prevedere la difficoltà che presenta la teoria meccanica dell'elica. Qui, più che altrove, il calcolo dovrà prendere il suo punto di partenza nell'esperienza: e quando si potrà impiegarlo utilmente, ciò sarà solo per ottenere delle formole approssimate applicabili nelle condizioni stesse in cui si saranno determinati i coefficienti numerici che esse racchiudono. Ma sarà impossibile ricavarne conclusioni rigorose su diversi elementi importanti, come il passo, il tracciato della pala, ecc. Per rendersi conto dell'influenza reale di questi elementi, bisogna anzitutto ricorrere ad esperienze abilmente condotte, guidate da concezioni teoriche, controllate continuamente in tutti i modi possibili.

Il metodo sperimentale non è senza difficoltà, giacchè la piccolezza degli sforzi da misurare e la grandezza delle resistenze passive introdotte dagli apparecchi rendono le misure assai delicate e richiedono una grande ingegnosità nei metodi impiegati. Senza entrare nelle varie teorie ideate da vari autori parleremo delle esperienze sulle eliche aeree propulsive fatte da diversi scienziati.

Il professor Langley, l'astronomo noto di Washington, ha eseguito molte esperienze sulle eliche propulsive. Descriveremo dapprima l'apparecchio registratore, col quale il Langley determinava esperimentalmente la relazione tra la forza propulsiva e la potenza impiegata.

L'apparecchio registratore era denominato « Dinamometro cronografo ». Un albero porta l'elica, esso è messo in movimento da un motore; l'albero è tagliato in due parti, alle quali sono fissati rispettivamente i cilindri D e E, potendo essi scivolare e ruotare l'uno dentro l'altro. Una molla a spirale attaccata ad una estremità all'interno del cilindro D, e all'altra estremità dalla parte dell'albero che porta l'elica, serve a trasmettere la coppia motrice da una parte all'altra.

In una scanalatura elicoidale, scavata sul cilindro D, si sposta un cursore fisso al cilindro E, di modo che la rotazione relativa si traduce in uno spostamento longitudinale del cilindro E, sposta-

mento che un lapis *P* scrive sopra un cilindro registratore *C*. Per potere registrare le coppie i cui valori sieno compresi tra limiti assai estesi, si può fissare una vite *V* in una serie di buchi numerati da 0 a 15 sulla circonferenza del cilindro *D*, in modo da raccorciare a volontà la parte attiva della molla a spirale. Si stabilisce empiricamente la relazione tra la coppia motrice e lo spostamento del lapis *P* per ogni porzione della vite.

L'albero è inoltre tagliato in due parti all'interno del cilindro *F*; da una parte e dall'altra del taglio, le due parti sono disposte in modo da ruotare sempre insieme e da non avere moto relativo che secondo l'asse. Lo sforzo agente secondo l'asse è controbilanciato dall'azione della molla a cartoccio collocata nel cilindro *F* e le cui variazioni di lunghezza sono registrate dalla penna *P'*.

Si stabilisce così empiricamente la relazione tra gli spostamenti di questo lapis e gli sforzi secondo l'asse.

Una terza penna *P''*, messa in azione da un'elettro-calamita, inscrive i tempi, ciò che permette di determinare la velocità di rotazione del cilindro registratore e di sincronizzare i fenomeni registrati.

Esso è mosso da un meccanismo d'orologeria. Passiamo ora ad esaminare i risultati delle esperienze del Langley.

Il Langley trovò che un'elica con un piccolo numero di ali ha il massimo rendimento.

Nel caso di elica propulsiva, se le ali sono numerose, ciascuna taglia l'aria già colpita dalle precedenti, aria che avendo già ceduto alla pressione delle ali stesse non offre più evidentemente la stessa resistenza dell'aria non ancora agitata.

Più grande è la velocità d'avanzamento, più debole è il rinculo, e più grande è il rendimento dell'elica. (È noto che per « rinculo » si intende la differenza tra la velocità che si otterrebbe se l'elica penetrasse nell'aria come in una madrevite solida e la velocità reale di avanzamento).

Le esperienze del Wellner furono fatte per ciò che riguarda le eliche propulsive con un altro apparecchio. L'elica e il suo motore sono sospesi ad un pendolo, essendo il loro asse comune orizzontale

Un settore diviso, sul quale si può muovere un indice collocato sotto al motore, dà l'angolo determinato dalla spinta attorno al

perno superiore; si può quindi dedurre il valore di questa spinta in chilogrammi.

Le esperienze del Langley hanno messo in evidenza che

1° Il rendimento dell'elica varia rapidamente col variare dell'angolo di attacco: è rimarchevole la presenza di un massimo assai nettamente distinto.

2° Le eliche ad ali concave sono le più convenienti.

Il Colonnello Renard ha fatto interessantissime esperienze sulle eliche sostentatrici ricavandone formole molto interessanti. Ma non ne facciamo cenno, interessando i dirigibili solo le eliche propulsive.

Recentissime esperienze sono state fatte a Parigi al *Conservatoire des Arts et Métiers* e presso il *Battaglione degli Areostieri Prussiani.* Infine la Brigata Specialisti ha fatto nel laboratorio areodinamico molte esperienze i cui risultati furono applicati alle eliche dei dirigibili militari N. 1 N. 1 *bis;* ma di esse parleremo quando tratteremo del dirigibile militare Italiano.

Notevolissimi sono anche gli studi del Drzewiecki.

In conclusione però si deve riconoscere che nessuna delle esperienze precedenti risolve completamente la questione delle eliche aeree. Infatti, nessuna permette di calcolare per un caso determinato le dimensioni che dovrà avere un'elica per ottenerne il massimo effetto utile.

Finora non ci si può basare che su dati assai generali e sopra concezioni teoriche che l'esperienza verifica più o meno.

I differenti sperimentatori si dividono attualmente in due parti distinte: la prima preferisce l'elica di grande diametro ruotante a debole velocità; l'altra che ha molti fautori in Inghilterra, in Germania ed in America, preconizza l'impiego di piccole eliche a grande velocità.

Se il peso del motore fosse indifferente, l'elica dovrebbe avere

1° Piccole dimensioni;

2° Una grande velocità di rotazione;

3° Il passo che dà il massimo della spinta.

Si otterrebbe così colla spinta massima, l'elica più leggera. Ma nel problema della navigazione aerea il peso del motore è un elemento capitale: e siccome, per produrre una spinta determinata, occorre una potenza inversamente proporzionale al rendimento del-

l'elica, ossia alla spinta che essa dà per cavallo; risulta che la grandezza del rendimento, ha una importanza capitale.

Per avere un grande rendimento, l'elica deve avere

1° Dimensioni sufficientemente grandi;

2° Una velocità di rotazione piccola;

3° Il passo corrispondente al migliore rendimento.

Spetta dunque all'ingegnere stabilire una specie di equilibrio e costruire in ogni caso speciale una elica, di dimensioni e di forma appropriate al suo scopo, alla quale egli darà la velocità di rotazione necessaria per assorbire la potenza di cui dispone.

§ 16. — *I motori per dirigibili.* — La questione dei motori leggeri è della più alta importanza non solamente per la navigazione aerea, considerata dal lato della aviazione, ma anche dal lato dirigibili: oggi giorno si è arrivati ad una grande leggerezza specifica ossia ad un debole peso per cavallo utile; il merito spetta essenzialmente ai costruttori.

È impossibile dare regole precise per ottenere l'allegerimento del macchinario propriamente detto. La soppressione di tutti i pezzi inutili e l'impiego, per gli altri, del metallo che lavora meglio, a parità di volume, avuto riguardo allo sforzo da sopportare; la scelta delle forme, solidi di uguale resistenza, alleggerimenti, ecc.; la cura di evitare gli urti, di equilibrare gli organi animati da movimenti rapidi, e infine di affidare ad uno stesso pezzo parecchie funzioni; tali i principali mezzi di realizzazione della leggerezza del macchinario.

Esistono attualmente acciai nichelati, cromati infinitamente più resistenti degli acciai di una volta; l'impiego dell'alluminio in leghe si può usare solamente per pezzi secondari che non richiedono una grande resistenza. Attualmente una grande fabbrica tedesca produce un materiale chiamato *elektron* che ha un peso inferiore di un terzo a quello dell'alluminio ed una resistenza tre volte superiore.

Oltre alla leggerezza, la qualità che deve avere un motore è la sicurezza di funzionamento. Un'interruzione di esso può essere fatale; specialmente nei dirigibili a sistema non rigido, nei quali la tensione dell'involucro e quindi la sua forma, sono mantenute dalla pressione dell'aria nel ballonet, pressione che il motore produce per mezzo di un ventilatore.

Attualmente l'industria privata costruisce eccellenti motori per dirigibile: non ci dilunghiamo nella descrizione di essi, distogliendoci ciò dal nostro programma.

§ 17. — *I principali dirigibili - Dirigibili francesi.* — Cominceremo col descrivere il dirigibile tipo Lebaudy. Questo areostato appartiene al tipo semirigido, ed è stato ideato dall'ingegnere Julliot. L'involucro ha la forma della figura 48. Essa è quella di un sigaro avente anteriormente una punta e posteriormente una

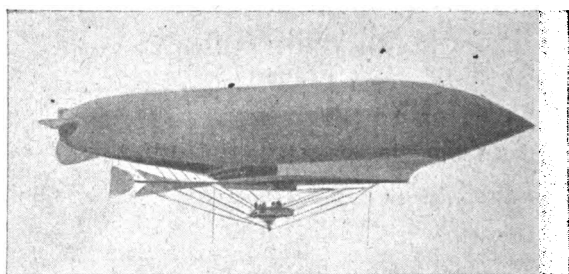



Fig. 48.

parte elissoidale. Questo involucro è dissimetrico, la sezione maestra è a circa due quinti della lunghezza a partire dal davanti. In tutta la parte mediana l'involucro presenta una parte piatta mantenuta da un quadro rigido di forma pressochè ellittica, che si attacca alla parete dell'involucro e da l'altra parte sostiene la sospensione della navicella. I bordi dell'armatura ellittica sono legati al pallone coll'intermezzo di un piccolo frammento di rete, le cui maglie superiori si attaccano a dei bastoncini abbottonati ad un bordo cucito e incollato sulla stoffa del pallone.

Infine la parte anteriore di questa piattaforma è munita da una prua formata da una tela tesa, che impedisce all'aria di insinuarsi durante la marcia tra la piattaforma e il pallome.

L'involucro deve essere: solido per resistere alla soprapressione del gas interno, impermeabile all'idrogeno, elastico per subire certi sforzi e leggere deformazioni senza strapparsi, leggero e di una grande durata. Esso è costituito da una stoffa doppia, gommata, comprendente due tessuti di cotone a fili incrociati, e due strati di

caucciù, l'uno tra i due tessuti, l'altro verso l'interno del pallone; in questo modo i difetti inevitabili dei due strati di caucciù vengono assai raramente a soprapporsi, e l'impermeabilità è sufficientemente assicurata perchè il pallone resti gonfio durante parecchi mesi. Inoltre lo strato interno a contatto diretto col gas preserva il tessuto dalla alterazione che sarebbe provocata dalle impurità accidentali. La resistenza di questa stoffa raggiunge 1500 chilogrammi per metro lineare, con un peso di 340 grammi al metro quadrato. Siccome i raggi luminosi hanno azione sul caucciù, per proteggerlo si tinge il tessuto esterno d'un colore non attinico, il bicromato giallo di piombo.

Per mantenere l'invariabilità di forma ad un tale areostato, si dà al gas interno una soprapressione di 30 mm., sufficiente per assicurare la forma con una velocità da 40 a 45 kilometri l'ora, di cui il pallone è suscettibile. Delle valvole s'aprono automaticamente allorchè la pressione raggiunge i 40 mm. d'acqua. Il pallone non è diaframmato; se lo fosse stato, forse, si sarebbe evitata la catastrofe del dirigibile *République* fatto sullo stesso tipo Lebaudy.

Nell'interno del pallone si trova il ballonet limitato da una stoffa semplice gommata. Il suo volume, che è circa un sesto del volume del pallone, permette di raggiungere l'altezza di 1500 metri senza pericolo che il pallone si vuoti di gas all'atterraggio. Per limitare gli spostamenti dell'aria nel ballonet questo è diviso in tre compartimenti da due diaframmi non impermeabili e pieni di buchi. L'aria immessa nel compartimento centrale si distribuisce nei compartimenti estremi attraverso detti buchi. Il ballonet è collegato con un ventilatore a grande portata collocato nella navicella. Questo ventilatore può essere messo in azione sia dal motore ad essenza che mette in moto i propulsori, sia a braccia. Esso è di rame e alluminio, per modo che l'urto delle ali sulla sua armatura non possa in alcun modo dare luogo a scintille. Esso può, quando è innestato, erogare un metro cubo d'aria al secondo; ciò che permette di tollerare durante le discese una velocità di due metri e cinquanta al secondo. Gli accessori dell'involucro sono

1° Una valvola superiore del gas per il gonfiamento del pallone.

2° Due valvole inferiori per gas, automatiche alla pressione di 40 mm. d'acqua.

3° Due valvole inferiori per aria, automatiche per la pressione di 30 mm. d'acqua.

La stabilità verticale e orizzontale è ottenuta per mezzo di piani di coda orizzontali e verticali. Questi piani sono costituiti da telai di tubi di acciaio al nichel, sui quali sono tese delle stoffe ignifughe.

Il primo piano fisso orizzontale è il quadro ellittico di cui abbiamo parlato prima.

Il primo piano fisso verticale forma una chiglia sotto la metà posteriore di questo quadro ellittico.

La seconda serie di piani stabilizzatori (piani di coda) fa seguito al quadro ellittico, col quale essa è articolata. È una penna di freccia che si dispone come la coda di un uccello.

Il terzo impennaggio è stabilito dietro l'involucro.

Tale impennaggio è detto *papillon*. In un suo notevole articolo pubblicato nella « Revue Scientifique » il comandante Bouttieaux espone le osservazioni che egli ha potuto fare nelle esperienze con e senza papillon.

Senza papillon, il pallone subisce leggeri movimenti di beccheggio, che d'altronde non sono mai abbastanza forti da mettere il motore in pericolo a causa delle variazioni dei livelli dell'olio o della benzina, nè da produrre sulle sospensioni delle trazioni esagerate.

Il pallone è soggetto a beccheggio aperiodico, e non tarda a riprendere la sua posizione normale.

Col papillon, non si ha beccheggio apprezzabile.

I cambiamenti di direzione sia nel piano verticale che nel piano orizzontale, sono ottenuti per mezzo di timoni e di piani mobili.

I timoni verticale e orizzontale sono compensati; il loro asse di rotazione è situato a tre decimi circa della superficie a partire dal davanti. Il timone verticale (timone di coda) è all'estremità della penna crociale.

Il timone orizzontale (timone di coda) fa parte dei piani di coda: esso è sdoppiato e riportato a sinistra e a destra della penna croce; esso si può inclinare nei due sensi.

Il pilotaggio dinamico si fa non solamente col timone di coda, ma ancora coi piani mobili, il cui asse di rotazione passa in vici-

nanza del centro di gravità del pallone; questi piani mobili sono costituiti da ali compensate situate da una parte e dall'altra del pallone, essi si possono inclinare in un senso e nell'altro.

La navicella (fig. 49) ha la forma di un battello a fondo piatto. Essa è costituita di tubi di acciaio e rinforzata da lamiere di alluminio.

Allo scopo di sostenere solidamente l'albero orizzontale delle eliche, è stato disposto, al di sotto della navicella, una specie di

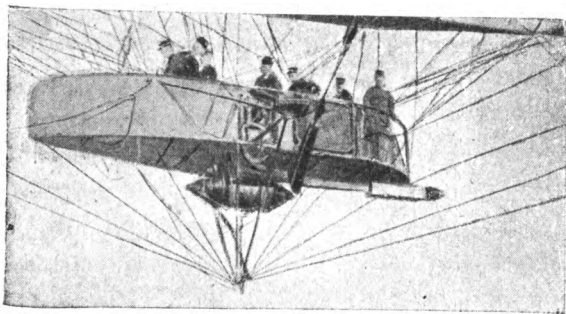



Fig. 49.

prua di forma piramidale composta di tubi e di tiranti e la cui punta serve di attacco alle funi di manovra necessarie. Il pallone riposa sul suolo su questa punta di piramide; non vi è bisogno di una base più solida, giacchè, al contrario nei palloni sferici ordinari, l'atterraggio di un pallone dirigibile non esige uno sgonfiamento immediato. Per esempio nel 1903, il *Lebaudy-Julliot I*, fu trascinato dal vento per una lunghezza di 200 metri sulla sua punta senza il minimo danno.

La navicella è divisa all'interno in parecchi compartimenti. Nel compartimento triangolare anteriore si trovano gli organi di atterraggio; questo compartimento è senza fondo per modo che i diversi organi possono essere lasciati cadere, senza che occorra lanciarli al disopra del parapetto. Il compartimento seguente è riservato ai due areonauti incaricati della manovra, il compartimento centrale comprende il motore, poi viene il compartimento dei meccanici e dei passeggeri; infine nella parte triangolare posteriore vi sono i recipienti della benzina e i sacchi di zavorra.

Nel compartimento dei piloti si trovano diversi organi di manovra e tutti gli strumenti (volani di direzione, corde di valvole, manometri, barometri, statoscopi, carte, estintori, ecc.).

Il motore è del tipo impiegato nelle vetture da corsa, il radiatore e il ventilatore sono collocati di fianco alla navicella. Il serbatoio di benzina è collocato sopra la navicella. Il tubo di scappamento è collocato sopra la navicella, verso la parte posteriore, lontano da ogni uscita di idrogeno; esso è protetto da tele metalliche che, in caso di cattivo funzionamento dell'accensione del motore, spengono le lingue fiammeggianti.

Le eliche, in numero di due, sono collocate *simmetricamente* a sinistra e a destra della navicella e ruotano in senso contrario. Esse sono costruite in lamiera di acciaio di 1 mm. circa di spessore e ruotano colla velocità del motore. La navicella è sospesa al disotto della piattaforma ovale per mezzo di sospensioni in fili di acciaio.

Non parleremo delle campagne fatte dai diversi modelli leggermente modificati, ossia del *Lebaudy-Julliot I* (1902-1903), del *Lebaudy-Julliot II* (1904-1905). Diremo invece qualche cosa del *Lebaudy-Julliot III*. Gli esperimenti con questo pallone furono fatti sotto il controllo degli ufficiali del parco di Chalais-Meudon, allo scopo di applicare tale dirigibile alle operazioni militari.

La prima manovra che si proposero di fare, fu quella dell'ormeggio in piena campagna di un apparecchio offrente una così grande resistenza al vento. Non bisogna pensare, di separare ogni volta il pallone dalla navicella per difenderlo meglio: giacchè le operazioni del distacco e dell'attacco della medesima sono troppo complesse. Bisogna ormeggiare il pallone nella condizione medesima in cui si trova, collocandolo sempre colla punta al vento.

§ 18. — *Sistemi di ormeggio per palloni dirigibili.*— Ecco il dispositivo di ormeggio adottato dal Comandante Bouttieaux, dal Capitano Voyer e dall'ingegnere Julliot. Si munisce la parte anteriore della piattaforma con un certo numero di corde metalliche formanti una rete di piè d'oca e facenti capo ad un'unica grossa corda di canapa: questa, disposta anteriormente nel piano di simmetria longitudinale del pallone, è attaccata ad un solido palo o ad un albero di gros-

sezza sufficiente. Delle funi laterali attaccate parimenti alla piattaforma e fissate dall'altra parte a dei picchetti impediscono al pallone di porsi per traverso sotto l'influenza delle raffiche. Infine la navicella, fortemente zavorrata, è fissata al suolo con forti ormeggi. Tuttavia conviene notare che la direzione del vento si modifica durante l'ormeggio. Così si deve prevedere la possibilità di fare ruotare l'insieme del dirigibile attorno alla punta della piramide situata sotto la navicella. A questo scopo si descrive da una parte e dall'altra del punto d'ormeggio anteriore, da prima scelto, un arco di cerchio avente per centro la punta della piramide, e si piantano preventivamente parecchi picchetti lungo questo asse. Una operazione analoga si ripete per i punti di attacco laterali, e per quelli della navicella. Allorchè il pallone non presenta più la sua punta al vento, si può rettificare rapidamente la sua posizione al vento cambiando i punti di ormeggio.

Gli esperimenti preliminari, eseguiti nel piano di Moisson, mostrarono la necessità, per il *Lebaudy*, di togliere ogni volta le eliche, esposte a toccare terra e a torcersi, allorchè il pallone si abbassava. Inoltre si riconobbe l'impossibilità di abbandonare il dirigibile a sè stesso sotto la custodia di personale poco numeroso, come si fa per il pallone sferico: conviene lasciare permanentemente, per un pallone delle dimensioni del *Lebaudy*, una guardia di 50 uomini, ripartiti gli uni alle corde di attacco, gli altri ai tiranti davanti e di dietro.

Nelle esperienze di ormeggio fatte recentemente a Satory, col *Lebaudy-Julliot IV* (divenuto dirigibile di istruzione) il Comandante Voyer ha adottato il dispositivo seguente.

Una rete è tesa tra cavalletti smontabili, ad un'altezza sufficiente. Il pallone vi è condotto sotto. La navicella è sopracaricata di zavorra; la rete viene abbassata sull'involucro, imprigionandolo, e viene fissata ai bordi della piattaforma centrale ovale. Dai bordi di questa piattaforma partono degli ormeggi disposti a raggiera e fissati a picchetti. Una seconda corona di ormeggi parte dalla rete al disotto dell'equatore del pallone e s'attacca a dei picchetti collocati un pò più al largo. Altre funi lo imbracano. Anteriormente esiste una corda a piè d'oca, i cui piedi vanno ad attaccarsi assai lontano, a delle vetture cilindri, perpendicolarmente all'asse del

pallone e passando per la sua parte anteriore, dove altre funi di ritegno sono fissate alla stessa maniera. Questo pallone può essere orientato al vento; basta spostare i punti dell'ormeggio anteriori e allentare o tirare gli ormeggi della rete e della piattaforma rispetto ai picchetti, senza spostare questi ultimi. Questo sistema, che può essere applicato in due o tre ore, ha resistito perfettamente alle tempeste del 21 e 22 giugno 1909.

§ 19. — *Ancora i dirigibili francesi.* — Sul tipo *Lebaudy III* fu costruito, per ordine dell'amministrazione militare francese, il *Patric,* che ebbe un volume di 3650 metri cubi allo scopo essenzialmente di portare una maggiore quantità di zavorra. I palloni militari che devono elevarsi ad un'altezza compresa fra i 1000 e 1500 metri, per evitare i proiettili nemici, hanno bisogno di portare una quantità sufficiente di zavorra, destinata ad essere gettata per elevarsi.

Allorchè la temperatura aumenta, la forza ascensionale diminuisce.

Se $\varphi = a - b$ indica la forza ascensionale di un metro cubo di gas alla temperatura t e alla pressione P; e se $\varphi_0 = a_0 - b_0$ indica la forza ascensionale di un metro cubo di gas a 0 gradi e alla pressione P_0, si ha

$$\varphi = \varphi_0 \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{1 + \alpha t} \qquad \alpha = \frac{1}{273} = 0,00367$$

e, se $P = P_0$,

$$\varphi = \varphi_0 \frac{1}{1 + \alpha t}.$$

Per un'elevazione di temperatura da 0° a t gradi, la perdita relativa di forza ascensionale è

$$\frac{\varphi_0 - \varphi}{\varphi_0} = \frac{\alpha t}{1 + \alpha t},$$

o approssimativamente la perdita di forza ascensionale per grado e per metro cubo è uguale a $\varphi_0\ \alpha$. Per l'idrogeno questa perdita è uguale a

$$1{,}13 \times \frac{1}{273} = 0{,}0041 \text{ Kg.}$$

Per un pallone di 3250 metri cubi, questa perdita è uguale a:

$$3250 \times 0{,}0041 = 13{,}325 \text{ Kg.}$$

per grado, ossia per un'elevazione di 25 gradi:

$$13{,}325 \times 25 = 333{,}125 \text{ Kg.}$$

Tale dirigibile fu il primo che fece un lungo viaggio, recandosi il 23 novembre 1907 da Chalais-Meudon a Verdun.

Dopo tale brillante risultato, il dirigibile fu il 29 novembre 1907 colpito da sventura, giacchè nella notte sorse una terribile bufera che strappò il dirigibile stesso dalle mani dei soldati che lo tenevano con immensi sforzi. Esso fuggì nella direzione O. N. O. e probabilmente fu inghiottito dalle onde dell'Oceano.

Esso fu subito sostituito dal dirigibile *République*, solamente in piccoli dettagli diverso dal precedente.

Anch'esso fu perseguitato dalla sorte, giacchè come è a tutti noto, dopo aver reso all'esercito importanti ed utilissimi servizi nel periodo delle manovre, precipitò da un'altezza di 200 metri, avendo una pala dell'elica, rottasi improvvisamente, strappato l'involucro.

Attualmente il parco areostatico francese, in seguito alla perdita dolorosissima del dirigibile, che costò la vita di quattro valorosi areonauti, ha sostituito le eliche di legno alle eliche di metallo, che, in seguito agli enormi sforzi cui erano sottoposte alla rotazione di 1200 giri al minuto, facevano modificare la struttura del metallo stesso, rendendolo molto meno resistente. La velocità sarà anche ridotta a 450 giri al minuto. L'involucro, in seguito a recenti disposizioni, sarà diviso in vari compartimenti per mezzo di diaframmi.

Accanto a questi palloni del tipo semirigido Lebaudy-Julliot hanno dato ottimi risultati i palloni non rigidi, di cui il proto-tipo è il dirigibile *Ville-de-Paris* (fig. 50).

L'involucro è costituito anch'esso da stoffa doppiamente gommata. La generatrice dell'involucro è attualmente costituita da due parabole di terzo ordine o cubiche. In mezzo si trova il fuso di scappamento, che permette a volontà del pilota di sgonfiare rapidamente l'involucro del suo gas. Alla parte posteriore è sospeso l'impennaggio

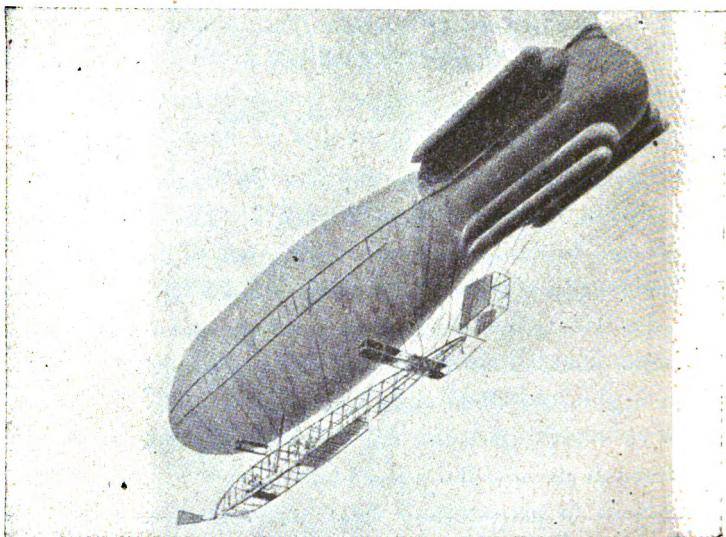



Fig. 50.

non rigido, composto di quattro ballonets del tipo preconizzato da Hervé e dal Colonnello Renard, come abbiamo detto precedentemente.

Secondo il Colonnello Renard (Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, 18 luglio 1904), un involucro a grande velocità deve possedere un impennaggio almeno doppio dell'impennaggio che denominammo *Strict*. Per un involucro della forma generale del pallone *La France* (fig. 45), l'impennaggio *Strict* è dato dall'equazione

$$0{,}145\, a\, d^3 = 1{,}6 \times 0{,}035\, a\, E_s\,,$$

essendo d il diametro della sezione maestra o sensibilmente

$$E_s = d^3.$$

Per rendere il beccheggio aperiodico, bisognerà prendere, per questo tipo di involucro

$$E = 2d^3.$$

Per un pallone di 10 metri di diametro massimo, si ha

E = 2000 = superficie di 100 metri quadrati moltiplicati per 20 metri.

Si può realizzare un tale impennaggio per mezzo di un ballonet di poppa. Il ballonet di poppa ha 10 metri di lunghezza, gli *ailerons* hanno 5 metri di diametro e 8 metri di lunghezza. Il Colonnello Renard non propone di fare comunicare il ballonet di poppa e gli ailerons colla carena; esso ne forma semplicemente una tasca d'aria.

Allo scopo di ripartire il peso della navicella su tutto l'involucro, essa è costituita da una trave armata fusiforme costruita con tubi di acciaio riuniti da raccordi e da fili di acciaio tesi. Essa è rivestita di stoffa gommata e di lamiera di alluminio nelle parti ove si trovano il motore, le cabine del pilota e dei viaggiatori. Allo scopo di permettere al pilota di vedere meglio le manovre alla partenza, e all'atterraggio, il suo posto è sopra elevato.

Il timone verticale è composto di due piani paralleli verticali in acciaio.

Il timone orizzontale di testa (piani mobili del pilotaggio dinamico) è formato da tre piani soprapposti d'acciaio; esso è collocato un poco più avanti del centro di gravità.

Questi timoni sono equilibrati e comandati da funi di acciaio messe in moto da organi irreversibili.

La navicella è fissata al pallone per mezzo di cavi di acciaio che si fissano a guisa di zampa d'oca ad una ralinga. Sotto la ralinga di sospensione, si trova un'altra ralinga, a cui sono attaccate le zampe d'oca della rete triangolare.

L'elica è di legno e del tipo *integrale Chauvière*. Essa ha il diametro di 5 metri; il passo è variabile progressivamente dal centro alla periferia, e dal bordo di attacco a quello di uscita. Essa è costruita di tavole di noce riunite o poste a ventaglio.

La velocità di rotazione dell'elica del *Clement-Bayard* è il terzo di quella del motore; essa oscilla tra i 680 e i 400 giri, ciò che corrisponde ad una velocità periferica di 105 metri al secondo. Il peso dell'elica è di 90 kilogrammi. Allorchè essa gira alla sua velocità massima, essa sopporta nelle sue ali uno sforzo, dovuto alla forza centrifuga, superiore a 19000 kilogrammi.

Nella *Ville-de-Paris* l'elica è articolata. Nelle pale, l'ossatura è fatta di legno rivestito di tela gommata. Il diametro è di 6 metri, il peso è di 90 kilogrammi.

L'elica è articolata da un sistema di bielle sottoposte allo sforzo di una molla, che serve a neutralizzare lo sforzo della spinta, compensandolo colla forza centrifuga. Ogni pala prende automaticamente la posizione che le permette di lavorare unicamente alla trazione e non alla flessione e di conservare alle pale la medesima inclinazione sull'albero dell'elica.

Per mantenere il ballonnet sotto pressione vi è un apposito ventilatore. Questo ventilatore centrifugo, specialmente studiato, si distingue per la sua leggerezza e per la sua grande portata. Esso è a pale paraboliche di lamiera di acciaio e di alluminio. La sua portata è di 7200 metri cubi all'ora ad una pressione di 30 mm. d'acqua. Mentre prima esso era azionato da un piccolo motore speciale, ora esso è, per semplicità o per leggerezza, mosso dal motore dell'elica.

§ 20. — *I dirigibili tedeschi.* — Dei dirigibili tedeschi parleremo prima del dirigibile *Von Parseval.* Esso appartiene al tipo non rigido. Tuttavia questo tipo si distingue dagli areostati francesi per alcune particolarità interessanti.

Il maggiore *Von Parseval* si è proposto di creare un tipo di dirigibile militare da campagna, facile da trasportarsi su due carri comuni militari al seguito dell'esercito, montabile in poche ore, da gonfiarsi facilmente sul posto, suscettibile d'essere sgonfiato, piegato e smontato colla stessa facilità di uno sferico.

L'impiego dei materiali rigidi è ridotto al minimo. L'involucro è mantenuto in forma da una soprapressione interna di 22 mm. d'acqua. L'involucro, assottigliato posteriormente, è cilindrico nella parte centrale e termina anteriormente con una calotta ovoidale

ig. 51 e 52). Esso contiene due ballonnets ad aria (*b* e *b* nella figura). no anteriore e uno posteriore. Essi servono a conservare la rigiità della forma e inoltre sono utilizzati per i cambiamenti di quota.

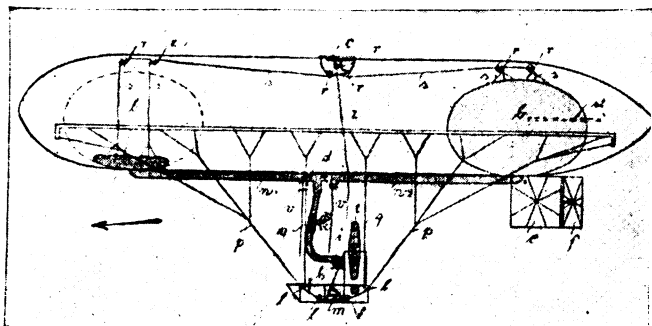



Fig. 51.

uando si vuota il ballonnet posteriore e si gonfia quello anteriore, dà all'asse dell'involucro una certa inclinazione dall'avanti all'inietro e quindi l'azione del vento proprio agisce dinamicamente sulla iperficie dell'involucro, permettendogli di salire.

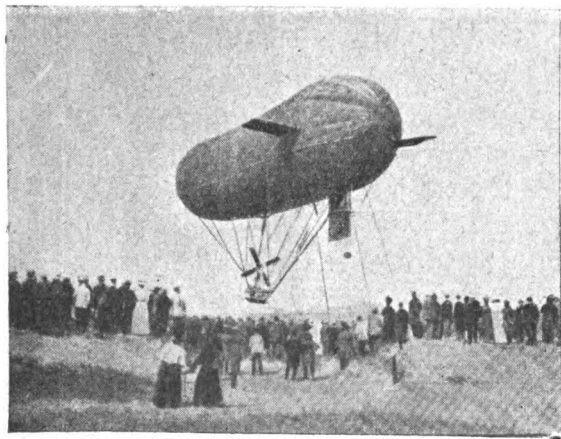



Fig. 52.

Dando all'asse dell'involucro un'inclinazione da 5 a 7 gradi circa i arriva ad ottenere delle variazioni positive o negative di 150 a 00 metri attorno alla zona d'equilibrio. Per variazioni di altezza iù grandi, è necessario l'impiego della zavorra.

Nella parte posteriore (fig. 51) sono disposti due impennaggi laterali, formati da intelaiatura di legno, rivestita di stoffa. Sotto all'involucro vi è un quadro avente la stessa costruzione (*f*), che forma come una chiglia per la stabilità di rotta, quadro parallelamente al quale si trova il timone verticale (*e*).

La navicella è collocata assai bassa al disotto del pallone, e si trova collegata all'involucro per mezzo di una sospensione elastica assai originale. Delle funi di sospensione parallele e sensibilmente verticali (*q* e *q*) legano la navicella alla parte mediana del pallone. Esse son combinate con dei cavi di acciaio (*p* e *p*) ascendenti obliquamente verso le estremità. Questi cavi sono disposti in tale maniera che la navicella si può spostare su detti cavi per mezzo di puleggie scanalate di guida (*l* e *l*) e oscillare liberamente nel piano mediano verticale, conservando nello stesso tempo il suo parallelismo rispetto all'asse del pallone. Questa disposizione ha per scopo di ridurre, in caso di modificazione dello sforzo di trazione dell'elica e della velocità del pallone, le oscillazioni dell'asse longitudinale, spostando automaticamente il centro di gravità della navicella.

Secondo il Maggiore, Von Parseval, i vantaggi di questo modo di sospensione della navicella, sono i seguenti

1° Soppressione della trave armata rigida lunga;

2° Possibilità di collocare l'elica tra il pallone e la navicella. allo scopo di attenuare la coppia rovesciante dovuta alla spinta dell'elica, e allo scopo di collocarla nella posizione meglio protetta contro i rischi di guasti all'atterraggio;

3° Soppressione del pericolo d'incendio a causa dell'allontanamento del motore dall'involucro;

4° Diminuzione dei movimenti di beccheggio provenienti dalle modificazioni di velocità.

Il propulsore è un'elica (nell'ultimo modello le eliche sono due) ad asse orizzontale collocata al disopra della navicella. Esso presenta quattro ali formate da un tessuto molle, allo stato di riposo. Quando l'elica funziona, il tessuto che porta dei pesi convenientemente ripartiti, si tende, e prende, secondo il Maggiore Von Parseval, la forma più conveniente. Tuttavia, come lo fece notare il Colonnello Renard, questo modo di costruzione non si presta all'esecuzione di superfici corrette e perfettamente liscie, senza le quali. le eliche non sono suscettibili di dare un buon risultato.

Secondo il Maggior Von Parseval, le eliche di 4,30 m. di diametro del suo dirigibile, ruotando a 260 giri al minuto, esercitano una trazione di 400 kgr. al punto fisso e di 250 kgr. in moto. Il dirigibile Von Parseval ha dato dei buoni risultati, sia come velocità (recentemente avemmo l'occasione di assistere ad una gara di velocità sul percorso Francoforte sul Meno, Mannhein e ritorno, nella quale erano a confronto il *Parseval IV* e lo *Zeppelin III*, la palma della vittoria toccò al dirigibile Parseval), sia come lunghezza di percorso e di durata, restando in aria più di 16 ore continue, sia come elevazione, avendo esso navigato a più di 1500 m. di altezza.

L'inconveniente maggiore che presenta questo dirigibile è che, se, per un motivo qualunque, viene a mancare la pressione interna (per esempio per cattivo funzionamento del ventilatore, delle valvole o del motore), l'involucro si deforma, pregiudicando enormemente la sua stabilità.

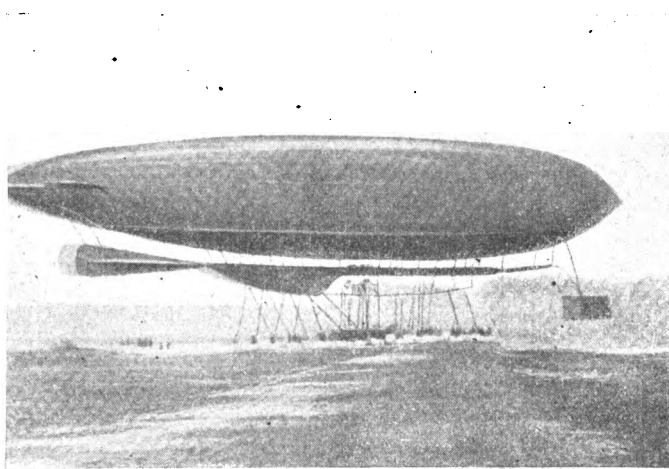



Fig. 52.

Tuttavia attualmente oltre al parco areostatico militare tedesco (che ne possiede due campioni) anche la Russia e l'Austria-Ungheria si provvederanno di dirigibili di questo tipo.

Il dirigibile Gross è del tipo semirigido, avvicinantesi assai al tipo *Lebaudy-Julliot*, già descritto.

I dettagli di costruzione di questo dirigibile son tenuti segreti essendo esso dirigibile militare; tuttavia si sa che l'involucro, la cui forma generale attuale è rappresentata dalla fig. 53, è attaccato ad

una lunga piattaforma rigida. Questa sopporta l'intelaiatura delle eliche e le superfici stabilizzatrici.

Questa maniera di costruzione è analoga a quella già proposta dall'ingegnere francese Soreau. Nella parte posteriore della piattaforma si trova l'impennaggio a croce dei dirigibili del tipo Lebaudy-Julliot; sul davanti vi è un piano stabilizzatore e su ambedue i lati, press'apoco verso il mezzo, sono disposti due piani, per il pilotaggio dinamico. Infine alla parte posteriore dell'involucro è fissato un piano orizontale, che non è altro che il piano orizzontale del *Papillon* del Lebaudy.

Alla piattaforma, e abbastanza in basso rispetto all'insieme, è sospesa la navicella, portante i motori, il ventilatore, gli areonauti.

I motori sono due, azionanti un paio di eliche a tre pale. Questo pallone ha due ballonnets interni. Di questo tipo ne furono costruiti tre esemplari. Il maggiore Von Gross ebbe come coadiutore nei suoi studi l'ingegnere Basenach.

Questo digibile si presta assai bene agli usi di guerra. Oltre che avere le qualità del Parseval già descritto, esso è esente dai difetti dello stesso. Nelle recenti manovre imperiali di quest'anno prestò grandissimi servigi come efficacissimo mezzo di ricognizione. A bordo di esso (il tipo *Gross III*) sono istallati gli apparecchi di telegrafia senza fili del così detto sistema *Telefunken*.

Il Conte *Zeppelin*, aiutante di campo generale del Re di Würtemberg, partendo dall'idea di realizzare un dirigibile capace di conservare la sua forma, ha costruito diversi areostati che portano il suo nome. L'areostato Zeppelin, è essenzialmente costituito da un'ossatura metallica in sbarre d'una certa lega d'alluminio a doppio e a semplice T: i tramezzi sono simili alle ruote di bicicletta. Essi hanno come mozzo un piccolo cerchio centrale, legato alla periferia per mezzo di fili di acciaio.

La carcassa è una vera trave rigida a sezione leggermente poligonale; essa ha la forma di un cilindro terminato da due punte coniche leggermente arrotondate. I tramezzi dividono la carcassa secondo la sua lunghezza in un certo numero di compartimenti. Ciascuna di queste cellule (salvo quelle di punta) riceve un palloncino di forma conveniente, in stoffa caucciuttata, impermeabile. destinata a contenere i gas di gonfiamento. Per ripartire la spinta

del gas sulla stoffa del pallone ogni compartimento è munito di una rete di fune a grandi maglie, secondo la forma dei palloni. Questi palloni infine sono in comunicazione gli uni cogli altri, allo scopo di realizzare le variazioni di pressione.

L'insieme, esteriormente alla carcassa, è avviluppato da una stoffa verniciata esternamente: essa non ha che lo scopo di diminuire l'attrito dell'aria sull'ossatura metallica, e di riparare i palloncini interni dagli agenti atmosferici. Inoltre, il materasso d'aria che si trova tra i due involucri ha lo scopo di diminuire il riscaldamento e il raffreddamento del gas. Tale fatto è importantissimo, giacchè per una massa gassosa come quello dello Zeppelin (17000 m. cubi), un solo grado centigrado di differenza tra la temperatura del gas del pallone e quella dell'aria ambiente, rappresenta una variazione di 60 kgr. circa di forza ascensionale totale.

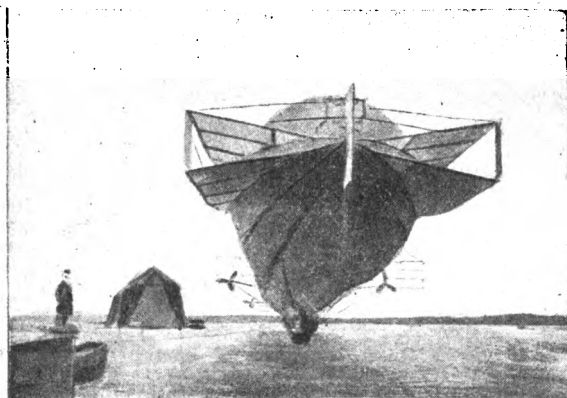



Fig. 54.

Il pallone (fig. 54) porta due navicelle in alluminio, aventi la forma di canotti, le quali possono all'occorrenza navigare sull'acqua, anche quando sostengono il pallone. Queste navicelle sono disposte simmetricamente rispetto al mezzo e alle punte del pallone; sono collegate fra loro per mezzo di una passerella.

Un contrappeso mobile di 100, 150 kgr. può essere spostato da una navicella all'altra; esso serve a stabilire l'equilibrio longitudinale e a compensare le variazioni di forza ascensionale sulle diverse parti del pallone. È così, che, nel viaggio del 5 agosto 1908,

avendo il sole scaldato in modo speciale la parte posteriore del pallone, l'equilibrio fu ristabilito dal contrappeso. Questo serve anche per gli atterraggi. Al momento in cui arriva al suolo, il pilota fa scivolare il peso equilibratore sul davanti, in modo da mettere a terra la navicella anteriore e da lasciare galleggiare quella posteriore, sicchè il pallone s'orienta da sè stesso nel senso del vento.

La forza motrice è data da due motori a benzina, movente ciascuno un paio di eliche. Queste sono disposte sui fianchi dell'involucro ed hanno il loro asse presso a poco al livello dell'asse longitudinale del pallone.

Dei timoni a molti piani disposti anteriormente e posteriormente servono per ottenere dinamicamente la stabilità di quota e il pilotaggio nel piano verticale senza proiezione di zavorra. Il Conte Zeppelin nella sua pubblicazione: « Erfahrungen beim Bau von Luftschiffen », asserisce che questi timoni producono, nel suo ultimo tipo di pallone, una forza sostentatrice da 800 a 900 kgr., per una inclinazione delle superfici di 15 gradi sull'orizzonte e per una velocità propria dell'areostato di 14 metri al secondo.

Dei timoni cellulari, posti posteriormente sui lati dell'involucro, hanno il loro asse verticale, stanno tra i piani stabilizzatori di coda e servono per la direzione nel piano orizzontale; attualmente vi si è aggiunto un grande timone verticale disposto alla parte posteriore.

I modelli finora eseguiti avevano una cubatura compresa fra i 13 e 17 mila metri cubi. Però un nuovo tipo è attualmente in costruzione. La sua cubatura sarà di 20,000 metri cubi. Avrà tre motori con tre paia di eliche e sarà capace di portare 40 uomini per un viaggio di 6 ore.

Nel 1909 lo Zeppelin ha fatto tre viaggi memorabili per la lunga durata.

L'itinerario del primo fu Friedrichshafen, Monaco, Bingolfing e ritorno.

L'itinerario del secondo viaggio fu Manzell, Bitterfeld, e ritorno causato dal tempo sfavorevole.

Il terzo viaggio fu secondo l'itinerario precedente, solo che il dirigibile si spinse fino a Berlino.

Altri viaggi lunghi, divisi però in diverse tappe furono quelli di Francoforte, Colonia, Düsseldorf, dove avemmo occasione di visitarlo e di vederne tutti i particolari.

Il sistema rigido del Conte Zeppelin presenta i seguenti svantaggi, che fanno contrapposto agli splendidi e straordinari vantaggi di lungo percorso e di lunga navigazione.

1° L'impiego di un involucro metallico porta di conseguenza un enorme aumento di peso, per esempio, nel modello di 16,800 metri cubi il rendimento dell'apparecchio, ossia il rapporto tra il carico utile trasportabile e la cubatura del pallone è di appena il 17 per cento.

Il pallone di stoffa al contrario, riducendo al minimo il peso, riduce al minimo il volume necessario al sollevamento di un dato peso: risulta che, per una data sezione trasversale, l'allungamento è più piccolo e la stabilità è più grande.

2° Il pallone metallico, dovendo avere necessariamente uno spessore assai piccolo rispetto alla sua grande superficie, è d'una costruzione assai delicata e di un'estrema fragilità. Il suo involucro non offre, sotto lo stesso peso, la stessa resistenza della seta, esso non ha sopratutto la stessa elasticità indispensabile per sopportare le piccole deformazioni passeggere, infine il complesso rende particolarmente difficile l'atterraggio.

3° Il gonfiamento a gas è complicato e difficile. Infatti occorre che nell'interno non vi sia una pressione differente da quella esterna, altrimenti l'involucro si deforma. Occorre collocare nell'interno del pallone un immenso involucro di seta, capace di riempire tutta la cavità; si dirige il gas nel sacco, che, svolgendosi, caccia l'aria che lo circonda; chiudono quindi le valvole e si toglie il sacco già preparato precedentemente a tale scopo.

4° Un tale involucro metallico è dannoso, a causa dell'elettrizzazione che si può produrre.

5° Infine l'involucro non può essere ripiegato e perciò non può essere trasportato.

Per tutte queste ragioni, il pallone ad involucro od armatura metallica non sembra pratico.

Inoltre se il pallone Zeppelin è idoneo a lunghi percorsi, non soddisfa però a due essenziali condizioni che deve avere un dirigibile per scopi di guerra e cioè:

1° Deve sollevarsi a non meno di 1000 metri per evitare i proiettili nemici. Lo Zeppelin non può fare ciò, sia perchè il sollevamento di tale enorme massa richiede un gettito enorme di zavorra, sia perchè il suo enorme volume costituisce un ottimo bersaglio.

2° Deve avere una grande velocità per raggiungere i dirigibili avversari, se meno potenti, sfuggirli, in caso contrario.

§ 21. — *Dirigibili inglesi.* — Gli areostieri inglesi nel 1907 hanno costruito un primo tipo di dirigibile, che ha ricevuto il nome pretenzioso di *Nulli Secundus I.*

Le principali caratteristiche di questo pallone sono le seguenti.

L'involucro è simmetrico, a forma di cilindro, terminato da due calotte sferiche. Esso è costituito da fogli di « baudruche » o pellicola dello stomaco di animali, assai impermeabile, ma molto costosa per la sua preparazione.

La sospensione è costituita da una rete che incappuccia le sue estremità e sostiene una grande armatura di sezione triangolare, che si stende sotto l'involucro per quasi tutta la sua lunghezza. Quattro larghe fascie di stoffa passanti al disopra della rete danno appoggio ad altre funi di sospensione d'acciaio terminanti all'armatura rigida.

Questa armatura rigida è divisa in due parti. La parte superiore supporta gli organi di *direzione* e di *stabilità*: un timone posteriore verticale, di forma esagonale irregolare, costituito da stoffa tesa sopra un telaio di bambù; dei timoni di quota collocati uno avanti e uno dietro, formati ciascuno da due piani sovrapposti terminati alle estremità da piani ausiliari.

La parte inferiore dell'armatura rigida ha una sezione triangolare. Essa sostiene la navicella (fig. 55).

Il motore ha la forza di 50 cavalli, l'elica è d'alluminio girante a 700 giri al minuto.

Questo dirigibile fece alcune uscite ma non molto fortunate.

Lo stesso accadde al *Nulli Secundus II,* di poco differente del precedente.

Un altro modello di dirigibile è il *Baby,* di aspetto pisciforme.

Posteriormente ha un impennaggio, il cui principio è lo stesso di quello dei dirigibili Ville de Paris e Clement-Bayard, ma di forma differente. Esso è costituito da tre ballonnets comunicanti coll'invo-

lucro e che rassomigliano assai a tre pinne. All'estremità superiore della trave armata, lunga 12 metri, si trovano i piani stabilizzatori e il timone verticale.

Questo dirigibile ha fatto una sortita, ma poco felice, non avendo forza ascensionale sufficiente.

Il ministero della guerra inglese ha ora ordinato in Francia un dirigibile tipo Lebaudy, come condizione di collaudo vi è quella che il dirigibile si porti coi propri mezzi da Parigi a Londra.

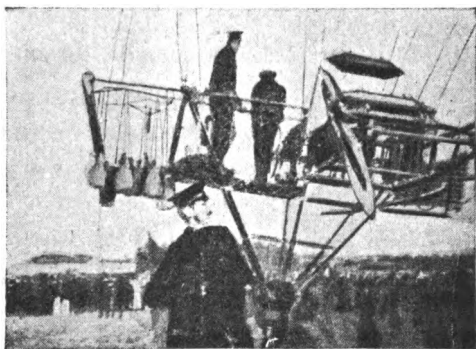



Fig. 55.

§ 22. — *Dirigibili di Sport.* — I dirigibili finora descritti non possono essere costruiti che da governi o da qualche rarissimo privato, possedente delle fortune considerevoli.

Perciò la *Société Zodiac*, ha costruito dei piccoli dirigibili economici.

Questo risultato è stato ottenuto:

1° Riducendo il volume del pallone;

2° Rendendo l'hangar inutile, il pallone smontato all'atterraggio, rimontato o rigonfiato per una nuova partenza può essere riparato in un locale sufficiente per un pallone sferico;

3° Sostituendo il gas illuminante al gas idrogeno che è circa 7 volte più caro;

4° Abolendo il personale fisso; pochi uomini sono sufficienti per la manovra come per un pallone sferico. Questi piccoli palloni automobili possono elevarsi da un punto qualunque dove si trovi un officina a gas sufficiente per gonfiare un pallone sferico. Essi pos-

sono parimenti prendere terra in un posto qualsiasi e raggiungere la loro dimora abituale, smontati e imballati come un bagaglio destinato alle ferrovie. Come esempio, citeremo il dirigibile Zodiac di 700 metri cubi di cui una copia fu pilotata a Brescia dal Conte Henry De La Vaulx.

Esso è del sistema non rigido, la navicella è lunga per ripartire il peso proprio a tutto l'involucro.

§ 23. — *Dirigibili misti.* — Consideriamo le due specie di macchine volanti, palloni dirigibili da una parte, e areoplani dall'altra. Paragoniamo per questi due tipi d'apparecchi, le maniere d'utilizzazione della potenza motrice.

Nei palloni dirigibili la potenza spesa per il sostentamento è trascurabile; la propulsione assorbe quasi interamente la potenza motrice.

Siccome la loro resistenza all'avanzamento è considerevole, a causa delle loro grandi dimensioni traversali, occorre un motore potente, per dare ad essi una velocità propria, capace di assicurare la loro dirigibilità in un grande numero di casi.

Negli areoplani al contrario, le cui forme sottili non offrono all'aria che una debole resistenza, la propulsione non esige che un debole impiego di potenza motrice. Questa è massimamente spesa per dare all'apparecchio la velocità orizzontale necessaria al sostentamento. Allorchè la velocità si annulla l'areoplano è obbligato a prendere terra, ciò che non succede col pallone.

Così, dal punto di vista del sostentamento, il pallone automobile, è superiore all'areoplano. Ma non accade lo stesso dal punto di vista della direzione.

Apparecchi misti sono quelli che dovrebbero riunire i vantaggi dei due sistemi.

I partigiani di questo sistema fanno notare che, per elevare lo stesso peso utile, il loro apparecchio può avere un volume inferiore a quello di un dirigibile ordinario. La diminuzione della resistenza all'avanzamento permette allora di avere una più grande velocità propria e quindi di accrescere le probabilità di dirigibilità.

Ma si vede dalla pratica che la riduzione della potenza spesa per la propulsione è assai piccola rispetto all'enorme accrescimento della potenza spesa per il sostentamento.

Come esempio citeremo il dirigibile misto Malecot.

Questo apparecchio (fig. 56) si compone:

1° d'una parte arecstatica, costituita da un pallone di forma allungata, un ballonnet occupa la parte inferiore dell'involucro;

2° d'una parte planante costituita da un lungo piano che mantiene la sua forma per mezzo di una trave armata di sezione triangolare, al centro della quale si trova la navicella destinata all'equipaggio e al motore che mette in azione un'elica propulsiva;

3° d'una terza navicella di stabilità, che può contenere la zavorra: questa navicella è collegata a un cavo di acciaio senza fine che può correre sopra puleggie scanalate collocate all'estremità della trave armata, cavo che l'equipaggio avvolge o svolge su di un verricello; all'estremità posteriore della trave armata si trova il timone di direzione.

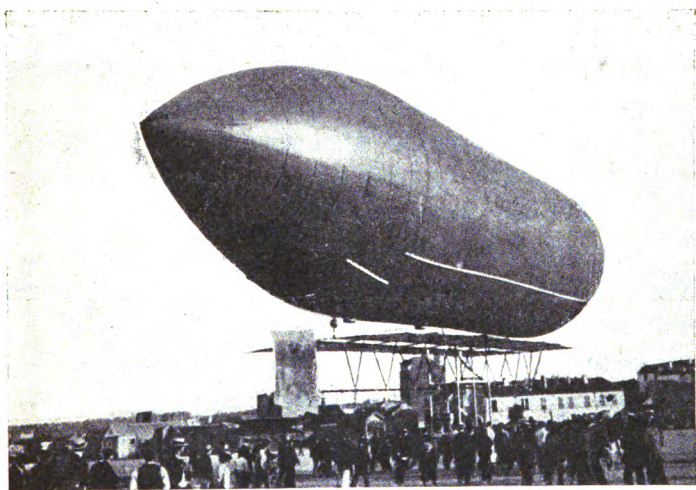



Fig. 56.

L'apparecchio si manovra come segue. Alla partenza il pallone solleva colla sua sola forza ascensionale la prima navicella, ma non può sollevare la seconda. Si mette allora in marcia l'elica e allora la reazione dell'aria entro la parte planante fornisce dinamicamente il supplemento di forza ascensionale. Per cambiare la quota, l'equipaggio sposta la navicella stabilizzatrice, aumentando o riducendo l'angolo di attacco della parte planante.

I risultati degli esperimenti fatti con questo dirigibile non sono stati molto fortunati.

§.24. — *Impiego dei dirigibili in guerra.* — Prima di parlare del dirigibile militare italiano, vediamo le applicazioni di un dirigibile alle operazioni militari.

La funzione di un dirigibile è anzitutto quella della ricognizione. Dal principio dell'apertura delle ostilità per terra e per mare i dirigibili avranno per scopo di determinare, nella regione del concentramento, i punti di sbarco delle truppe dalle ferrovie; oppure in caso d'una spedizione oltre mare, i punti di sbarco sulla costa. Essi dovranno osservare ciò che avviene nelle fortificazioni della frontiera e della costa e nei porti. I punti di passaggio dei fiumi nelle regioni limitrofe e le vie principali di navigazione saranno parimenti sottomesse all'osservazione dei palloni.

Una volta iniziate le operazioni, essi sorveglieranno i movimenti di concentrazione e le direzioni di marcia delle colonne e delle flotte. Prima, durante e dopo il combattimento, osserveranno l'estensione delle ali, la composizione e la dislocazione delle riserve, le posizioni d'artiglieria defilate, le opere di fortificazione passeggera.

Essi dovranno inoltre avere uno scopo offensivo. Il lancio di potenti cariche esplosive, su città assediate, su fortificazioni, su navi e truppe nemiche, produrrà effetti materiali e morali rilevantissimi sull'avversario.

Al congresso dell'Aja, la Germania ed altri Stati non hanno sottoscritta la clausola che vieta ai palloni di gettare esplosivi.

Daremo qualche cenno circa il lancio dei proiettili e di torpedini da bordo di un dirigibile.

Anzitutto si deve osservare che la capacità di trasporto di un dirigibile non è affatto grande, sicchè, se la velocità propria e il suo raggio d'azione sono notevoli, il peso riservato ai proiettili deve essere limitato. La tecnica è ancora giovane, ma il suo rapido sviluppo lascia comprendere che i dirigibili di grande cubatura possono soddisfare al doppio scopo dell'esplorazione e dell'offensiva.

I proiettili che si possono lanciare dal pallone sono:

1° Proiettili esplosivi contro fabbricati, materiale da guerra, navi ed uomini.

2° Proiettili incendiari contro fabbricati, dirigibili, palloni frenati, palloni liberi, macchine volanti.

3° Proiettili fumiganti contro uomini occupanti fortezze e villaggi.

I proiettili esplosivi della prima categoria devono avere un certo peso per essere efficaci. Riguardo ai fabbricati si tratta di sfondare tetti per distruggere l'interno, provocare l'incendio e rendere inservibile il materiale da guerra; di rovinare o affondare le navi, sfondando il ponte corazzato. Si possono anche lanciare proiettili, che nel caso in cui non colpissero il loro obbiettivo galleggiante, possono servire come mine distruttive nell'acqua stessa. In ogni caso, un dirigibile della cubatura dello Zeppelin può portare al massimo 4 o 6 torpedini insieme ai meccanismi di lancio analoghi a quelli delle torpediniere.

Il concetto di distruggere mediante torpedini aeree fortezze terrestri o torri corrazzate, si deve ritenere come problematico ed è necessario scartarlo, giacchè la loro resistenza è troppo grande e il loro bersaglio troppo piccolo per essere colpito.

Per la distruzione di edifici e materiali da guerra, non occorrono proiettili più grandi di quelli usati nell'artiglieria campale, ossia del calibro da 8 a 15 cm.; contro esseri animati sono sufficienti granate a mano.

I proiettili incendiari possono essere assai piccoli. La moderna chimica permette di impiegare materiali incendiari che con peso non maggiore di 100 o 200 grammi, possono produrre un incendio; ancora meno pesanti possono essere i proiettili contro dirigibili, palloni frenati, liberi e macchine volanti. Naturalmente occorre dare ad essi un certo peso, per impedire che le loro traiettorie siano deviate dal vento.

Si possono a tale scopo usare meccanismi ad aria compressa che imprimano al proiettile una certa velocità iniziale ed una rotazione.

I proiettili incendiari contro palloni e macchine volanti devono essere muniti di appositi uncini, per strappare la stoffa tesa degli involucri e delle ali delle macchine volanti.

I proiettili che devono incendiare la massa gassosa del pallone, devono, per provocare l'esplosione, mettere a contatto il gas con l'ossigeno dell'aria. Questi sono particolari tecnici facilmente solubili.

L'applicazione di tubi di lancio è particolarmente utile nei combattimenti tra dirigibili.

I proiettili fumiganti sono di piccolo peso: devono produrre gas dannosi all'organismo umano, ma occorre far sì che essi non vengano dispersi dal vento. Il lancio di tutte le torpedini aeree è naturalmente un'arte che dovrà essere studiata teoricamente e praticamente dagli artiglieri. La sicurezza di colpire il bersaglio dipende dalla sua grandezza e dalla quota del dirigibile; inoltre dalla deviazione del proiettile (che alla sua volta dipende dal vento e dalla quota del dirigibile) ed infine dal moto del dirigibile stesso.

Gli elementi per il calcolo del lancio di un proiettile dipendono dai seguenti fattori.

1° Determinazione delle quote del bersaglio sopra il livello del mare, in base alle carte topografiche, e della quota del dirigibile in base alle letture barometriche corrette; in altri termini determinazione della distanza verticale tra bersaglio e dirigibile.

2° Determinazione della velocità del vento, in base alla velocità di spostamento del dirigibile rispetto alla terra, a motori spenti. oppure ottenuta con anemometri e logs durante la marcia.

3° Determinazione della durata di caduta di un proiettile.

4° Determinazione della resistenza dell'aria sul proiettile stesso.

5° Deviazione del proiettile che cade.

Gli elementi terzo, quarto e quinto si possono leggere su tabelle preparate precedentemente; gli elementi primo e secondo devono essere determinati prima del lancio. Sopra al mare basta, per l'elemento primo, la lettura del barometro. Ogni apparecchio di lancio deve essere munito di congegni per il lancio del proiettile a tempo giusto; l'angolo di inclinazione dovrà cambiarsi a seconda dell'altezza del dirigibile e per ogni colpo. Occorre anche tener conto dello spostamento verticale del pallone per ogni diminuzione di peso prodotta dal lancio di un proiettile.

A tale scopo si ritiene che il dirigibile per sottrarsi ai colpi nemici deve mantenersi a una quota superiore ai 2000 metri. Per palloni di grande cubatura lo spostamento verso l'alto non è molto grande; si può applicare la legge che ogni pallone si alza di m. 80 se il suo peso diminuisce di un centesimo.

Perciò la variazione di altezza *Dh*, che il lancio di un proiet-

tile di peso g produce per un peso totale di G Kg. del dirigibile, si può calcolare colla semplice formola:

$$Dh = 8000 \frac{g}{G}.$$

Per esempio, per il dirigibile tipo Zeppelin del peso di Kg. 12,000 la variazione di altezza prodotta dal lancio di una torpedine di Kg. 50 sarà dato da

$$D h = 8000 \frac{50}{12,000} = 33,3 \text{ metri}.$$

Se i proiettili sono tutti dello stesso peso, si può subito dopo il lancio del proiettile modificare i dati dell'apparato, controllando solamente la nuova quota, ciò che è necessario perchè sino al lancio del nuovo proiettile le condizioni della temperatura atmosferica potrebbero agire sul gas del pallone e modificarne la quota.

Se il proiettile non viene semplicemente lanciato, ma spinto ad aria compressa, si deve tener conto della rotazione che assume il proiettile, che limita la deviazione e aumenta la probabilità di colpire il bersaglio; ma questo tiro contro bersaglio avviene solo contro pochi obbiettivi.

Nella guerra navale contro flotte nemiche sarà preferibile usare con miglior risultato il sistema delle mine distruttive contro le navi giacchè è assai più probabile distruggerle; tali mezzi sono di grande effetto nell'acqua, ma richiedono dirigibili di grande cubatura e di grande raggio di azione, che possano trasportare molte mine distruttive per rendere pericolosa con qualche successo la vasta zona occupata da una squadra; naturalmente converrebbe usare tale sistema quando la flotta nemica è in forma ammassata. Il marinaio non teme i dirigibili perchè li vede e li può facilmente combattere, il che non può fare coi sottomarini.

Se anche i dirigibili vengono fatti precipitare da un'altezza di 3500 metri, il che sembra possibile usando cannoni speciali contro palloni, il pilota del dirigibile dovrà disporre che con un'esplosione della propria nave aerea possa fare un ultimo tentativo di colare a picco una nave avversaria o almeno renderla inservibile.

Siamo forse ancora lontani dalla pratica esecuzione di queste idee, ma conviene tenerle presenti perchè la speciale tecnica aeronautica procede rapidamente.

§ 25. — *Artiglierie contro i dirigibili.* — Per difendersi dai dirigibili gli artiglieri hanno già proposti diversi mezzi; hanno costruito un cannone a tiro rapido sopra una vettura automobile, con corazze in acciaio al nichel di 3 mm. di spessore. Questa vettura, avente il motore capace di 50-60 cavalli, può avere una velocità normale di 45 kilometri all'ora e salire delle pendenze del 22 per cento. Sul davanti, al posto ordinario, si trova il sedile del conduttore; al centro della vettura si trova la bocca da fuoco; il cassone delle munizioni è collocato dietro e serve da sedile per gli artiglieri. Il cannone stesso è montato sullo chassis del veicolo, si può puntarlo in altezza e orizzontalmente, a volontà. Al momento dell'esplosione, il rinculo del pezzo è smorzato da un freno idraulico. L'approvvigionamento in munizioni del cofano posteriore è costituito da 100 cartucce *Bodenkammer,* shrapnell ovvero obici.

Ogni cartuccia shrapnell contiene 40 grammi di carica esplosiva e 150 pallette di piombo. L'ogiva porta 3 ali dentate; queste, in seguito alla rotazione dell'obice, s'aprono all'esterno e favoriscono lo strappamento del pallone colpito.

Il peso di questo automobile di guerra in ordine di marcia, con cannone, munizioni, essenza, acqua, pezzi di ricambio e cinque uomini (conduttore, puntatore, tre serventi) è di tre tonnellate. La più grande portata del cannone è di 7,800 metri, sotto un angolo di incidenza di 43 gradi.

Questo ordigno di guerra è stato costruito dalla Ditta *Reinische Metallwaaren und Maschinenfabrik* di *Düsseldorf*, su progetto dell'ingegnere Ehrhardt.

Le officine *Krupp* hanno fornito all'esercito tedesco dei cannoni che possono essere utilizzati, sia a posto fisso, nelle piazze forti, sia come artiglieria da campagna. Questo materiale ha parecchi perfezionamenti.

1° Esso possiede un campo di tiro laterale illimitato: le ruote sono mobili attorno ad un asse verticale e sono messe in una posizione tale che esse sono tangenti a una circonferenza il cui centro è uno sperone, che, posteriormente all'affusto, si affonda nel suolo.

2° La culatta si richiude automaticamente, al momento stesso in cui la cartuccia è entrata nella camera, ciò che impedisce la caduta di essa, in caso di grandi inclinazioni. I perni della bocca da fuoco

sono assai spostati verso la parte posteriore. Questa posizione ha l'inconveniente di lasciare la culatta e il freno senza grande appoggio. Per rimediarvi, si sostiene il tutto, per mezzo di potenti molle a cartoccio.

3° La bocca da fuoco è caricata con proiettili incendiari e fumigeni (emettenti durante il percorso una coda fumosa assai pronunciata), ciò che permette di seguire la loro traiettoria, invece di osservare solamente il punto di scoppio. La coda fumosa comincia a qualche distanza dalla bocca da fuoco, per non far conoscere all'avversario la posizione di quest'ultima.

I cannoni Krupp sono di diversi calibri.

1° Un pezzo di artiglieria da campagna di 65 mm. e di 35 calibri di lunghezza. Esso può tirare sotto un angolo di 60 gradi; la velocità del proiettile all'uscita è di 620 metri al secondo, il suo peso è di 4 chilogrammi.

2° Pezzo di 75 mm. e di 35 calibri di lunghezza, studiato specialmente per automobili e capace di tirare sotto un angolo di 75 gradi. Proiettile chilogrammi 6,5; velocità iniziale 650 metri al minuto secondo.

3° Cannone di marina del calibro di 105 mm. e di una lunghezza uguale a 35 calibri. Proiettile 18 chilogrammi; velocità iniziale 700 metri, inclinazione massima 75 gradi.

L'artiglieria avrà ragione dei dirigibili?

A parte che l'altezza grande in cui naviga il dirigibile e la sua velocità rendono il tiro difficilissimo per non dire impossibile, come sarà possibile che un automobile portante le artiglierie suddette possa inseguire un dirigibile, alla velocità di 60 chilometri l'ora, su strade che, in caso di guerra, saranno frequentatissime, piene di di truppe e di carriaggi?

In secondo luogo il tormento a cui sarà sottoposto lo *chassis* portante le artiglierie sarà enorme, specialmente sotto angoli di tiro superiori ai 45 gradi. Infine sarà assai difficile avere un rifornimento di munizioni, che invece dovrà essere abbondantissimo dato il tiro incerto.

Secondo noi, non ci si potrà liberare dai dirigibili nemici, questi occhi molesti dell'avversario, che con altri dirigibili. Si avranno vere lotte aeree. La vittoria spetterà ai dirigibili più veloci e capaci di raggiungere altezze superiori a quelle dell'avversario.

§ 26. — *Dirigibile militare italiano: studi preliminari.* — I dirigibili militari Italiani N. 1 e N. 1 bis furono iniziati nell'ottobre del 1907, ma le ricerche e i lavori areodinamici necessari per lo studio completo di un dirigibile furono iniziati nel 1903, nel quale anno fu creata presso la Brigata Specialisti la sezione esperimentale di areodinamica.

Il tenente colonnello Moris, appena assunse il comando della Brigata Specialisti, comprese subito l'importanza di tali studi areodinamici e fece costruire numerosi impianti, recentemente assai sviluppati, per modo che tale laboratorio areodinamico si può considerare allo stato presente delle cose come il migliore e il più completo fra quelli esistenti in tutti gli altri Stati.

Fu in seguito agli importanti risultati scientifici ottenuti, che le altre nazioni si posero subito all'opera e costruirono: la Russia l'istituto areodinamico di Koutchino, la Germania il laboratorio areodinamico di Göttingen; la Francia, avendo avuto alcune munifiche donazioni, sta per seguire il nostro esempio.

L'areodromo della Brigata Specialisti comprende un laboratorio per esperienze, ove sono riuniti gli apparecchi più diversi costruiti per eseguire ricerche sulla resistenza dell'aria, sulle eliche, sulle pressioni dei fluidi in movimento.

Un ventilatore mosso da un motore elettrico di 30 HP produce un vento artificiale necessario alle esperienze. La corrente d'aria si regolarizza passando da una specie di gazometro cilindrico di 5 metri di diametro, ove i movimenti turbinosi dei filetti fluidi sono distrutti.

La bocca del ventilatore, disposta ad una delle estremità del laboratorio, presenta una sezione quadrata di un metro di lato.

Le velocità del vento artificiale, ottenuto in tale modo, variano da 2 metri a 29 metri al secondo.

Queste esperienze ebbero per scopo di definire la resistenza opposta allo spostamento nell'aria dei diversi elementi costitutivi di un dirigibile e di un areoplano.

Gli esperimenti furono eseguiti su modelli ridotti collocati davanti alla bocca del ventilatore.

Al rinculo del modello, trascinato dal vento, ci si oppone per mezzo di un contrappeso tenuto da un filo (piatto della bilancia

carico di pesi). Il piatto può anche affondare in una vasca d'acqua allo scopo di smorzare gli spostamenti bruschi del modello.

Allorchè non si cerca una grande precisione, si sopporta il modello per mezzo di un carrellino di costruzione assai leggera.

Per l'esperienze più delicate, si sostituisce il carrello con un supporto galleggiante in una vasca d'acqua perfettamente calma.

Infine, per le esperienze che richiedono una grande precisione, si utilizza ancora il supporto galleggiante, ma il modello è sospeso a dei fili, invece di essere portato da una intelaiatura rigida. Si diminuiscono così le resistenze del sistema, e dove non si otterrebbe che una approssimazione di un grammo, si raggiunge facilmente un decimo di un grammo.

Si fece una prima serie di esperienze collo scopo di studiare i filetti fluidi proiettati indietro da un'elica in moto.

Se si conosce la direzione e la velocità di spostamento di questi filetti, si hanno tutti gli elementi per calcolare la quantità di moto e la forza viva, ossia la spinta e il lavoro motore. Se tutta la massa d'aria cacciata dalle pale dell'elica, fosse proiettata parallelamente all'asse, tutto lo sforzo prodotto si trasformerebbe in spinta e tutto il lavoro motore sarebbe utilizzato.

Sfortunatamente non è così, giacchè non è possibile che un'elica per quanto perfetta, non proietti obliquamente i filetti fluidi.

Sembrerebbe possibile ristabilire il parallellismo dei filetti fluidi, sia utilizzando una seconda elica ruotante in senso inverso, sía mediante un diffusore fisso. Però l'esperienza ha dimostrato che la perdita di forza viva dovuta ai nuovi attriti e agli urti dei filetti fluidi bastava a distruggere i vantaggi suddetti.

Per misurare la spinta, il lavoro motore e la coppia di torsione di un'elica, il Cap. Crocco ha immaginato una bilancia dinamometrica, analoga in principio a quella del Colonnello Renard, ma differente per i suoi dettagli di costruzione. Questa bilancia presenta il grande vantaggio di sbarazzare completamente l'elica dall'ingombro del motore e dei sopporti dell'apparecchio, di modo che l'aria aspirata al pari dell'aria respinta non incontrano nessuno ostacolo e i risultati non possono essere incerti. Inoltre essa permette di collocare l'elica dinnanzi al ventilatore e di studiarne il rendimento in una corrente aerea che l'attacchi sia di fronte che obliquamente.

Questa bilancia consiste in un quadro oscillante (sospeso alla Cardano) al centro del quale si colloca l'elica da esperimentarsi. Dei bracci di richiamo disposti parallelamente, si oppongono, per mezzo di contrappesi adatti, alla spinta e alla rotazione (momento torcente). Il motore elettrico che mette in azione l'elica è portato dal quadro stesso ed è collocato al disopra del cardano. Il centro di gravità si trova così assai vicino al punto di sospensione.

Per misurare la velocità del vento proiettato si adoperano un manometro differenziale e un pneumometro. Si sanno così per tutti i punti dello spazio le velocità del vento ed anche le pressioni in base alla relazione

$$p = \frac{1}{2} d V^2 ,$$

essendo p la pressione, d la densità dell'aria, V la sua velocità.

In altri termini, si possono ottenere tutti gli elementi del rendimento teorico di un'elica e si possono determinare le forme, le curvature, le inclinazioni, le velocità di rotazione per produrre un effetto continuo e di una data potenza.

In seguito a queste esperienze areodinamiche si potè sul finire del 1907 determinare la forma di minima resistenza di un solido che si muove nell'aria. La curva adottata per il dirigibile N. 1 fu quella di un arco di sinussoide dell'equazione

$$y = 44{,}6 \text{ sen } 4x$$

fatto ruotare attorno alla corda.

Come si è visto in ciò che precede le azioni dell'aria sull'areostato completo cioè a dire munito di piani di coda e di timoni, possono ridursi ai tre elementi seguenti:

1° Coppia rovesciante,

2° Pressione normale,

3° Coppia resistente;

nei quali si potevano distinguere gli elementi caratteristici

1° dell'areostato,

2° dei piani,

3° dei timoni.

Da questi elementi caratteristici, presi nel loro insieme, dipendono la stabilità ed il pilotaggio della nave aerea.

Per la ricerca di questi elementi caratteristici i mezzi seguiti sono di due tipi:

1° metodo diretto,

2° metodo dell'oscillazione.

Il metodo diretto *nell'aria* non fornisce i risultati attesi, giacchè le esperienze, dovendo essere condotte secondo la legge di similitudine meccanica, la velocità sarebbe assai piccola e le forze misurate sarebbero soggette ad errori dello stesso loro ordine di grandezza.

La similitudine meccanica permette al contrario di ottenere dei buonissimi risultati *nell'acqua*. Occorre naturalmente tenere conto delle densità dei mezzi, alle quali sono sensibilmente proporzionali le azioni dei fluidi, compreso l'attrito. Come si è già accennato, gli apparecchi utilizzati per il metodo diretto sono i seguenti.

In un bacino (lunghezza 180 metri, larghezza 3 metri, profondità 2,50) pieno di acqua (fig. 46), si fa muovere un modello del pallone in scala ridotta. Questo modello è portato da un piccolo carrello; e il carrello è collocato sopra un carro mobile messo in moto da un motore elettrico e scorrente sopra rotaie disposte parallelamente alla vasca. Il carrello, che ha piccolissimi attriti, è mobile a volontà, sia nel senso longitudinale che nel senso trasversale; i suoi spostamenti sono limitati da molle che misurano le forze messe in giuoco.

Dei cronografi e dei tachigrafi permettono di misurare la velocità del carro.

Con questi apparecchi, è facile misurare la *resistenza longitudinale* e la *pressione normale* all'asse della carena. Per studiare la *coppia rovesciante*, si lascia il modello libero di girare in un piano orizzontale attorno ad un asse verticale passante per il suo centro di gravità. Si mantiene la deviazione angolare per mezzo di una molla d'equilibrio che misura la coppia rovesciante.

Per studiare la coppia resistente si usa il metodo delle oscillazioni, non potendosi essa misurare direttamente. Tale esperienza si può fare nell'aria e nell'acqua; essa si fonda sui principi seguenti.

Se J è il momento d'inerzia del sistema che oscilli secondo la funzione $\theta = f(t)$, e animato nello stesso tempo da una velocità V di traslazione, se $C_1 \theta$ è la coppia totale che mantiene le oscillazioni, e se

$C_2 \dfrac{d\theta}{dt}$ è la coppia resistente, si può scrivere l'equazione del movimento oscillatorio in un modo approssimativo

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C_2 \frac{d\theta}{dt} + C_1 \theta = 0. \qquad (*)$$

Le quantità J, C_2, C_1 sono incognite. Si tratta di determinare C_2, senza conoscere J e C_1.

La risoluzione della (*) porta alla

$$\theta = \theta_0 e^{t} \operatorname{sen} \beta t,$$

nella quale

$$\alpha = -\frac{C_2}{2J}, \qquad \beta = \sqrt{\frac{C_1}{J} - \alpha^2}.$$

Si sa che si può conoscere α e β, rilevando un diagramma da una serie di n oscillazioni da θ_0 a θ_n; e misurando il decremento logaritmico e il periodo.

Se τ è il semiperiodo, si ha

$$\alpha = \frac{\log.\, \theta_n - \log.\, \theta_0}{n\tau}, \qquad \beta = \frac{\pi}{\tau}.$$

Se si eseguono due serie di oscillazioni, una col momento d'inerzia J incognito, l'altra con momento d'inerzia $J + J_0$, J_0 essendo arbitrario ma conosciuto, e se si chiamano con $\alpha, \alpha', \beta, \beta'$, i decrementi logaritmici e semiperiodi relativi alle due serie d'esperienze, si ha

$$\alpha = -\frac{C_2}{2J}, \qquad \alpha' = -\frac{C_2}{2(J+J_0)},$$

e quindi, dopo l'eliminazione di J,

$$C_2 = 2 J_0 \frac{\alpha\alpha'}{\alpha' - \alpha}.$$

La determinazione di C_2 porta facilmente alla determinazione dei valori di J e C_1, che d'altronde non interessano il problema e possono essere scelti arbitrariamente.

A questo metodo, rapido ed elegante, si deve necessariamente sostituire, spesso, un metodo meno diretto, ma praticamente più approssimato.

Si nota, a tale proposito, che nella espressione di β, la quantità α è assolutamente trascurabile. Si puo scrivere allora

$$\frac{1}{\beta^2} = \left(\frac{\tau}{\pi}\right)^2 = \frac{J}{C_1},$$

$$\left(\frac{\tau'}{\pi}\right)^2 = \frac{J + J_0}{C_1};$$

e per conseguenza

$$C_1 = \frac{J_0 \pi^2}{\tau'^2 - \tau^2}.$$

Si può allora determinare l'incognita J, e per conseguenza C_2. La bontà di questo ultimo metodo si basa sulla esattezza maggiore colla quale si può conoscere il periodo, di fronte alle difficoltà della misura esatta del decremento logaritmico.

Gli esperimenti idrostatici poi hanno servito a determinare:

1° La distribuzione delle forze ascensionali, per ottenere una forma conveniente.

2° A studiare la forma longitudinale e trasversale sotto diverse pressioni; si possono utilmente paragonare le deformazioni del modello con quelle del pallone.

3° Il centro di gravità e le variazioni di volume alle diverse pressioni.

4° Lo studio della coppia raddrizzante statica alle diverse pressioni e con differenti volumi d'aria nel ballonet.

5° Lo studio di un pallone diaframmato.

6° Lo studio delle piccole variazioni, nei diametri orizzontali, coll'aiuto di uno speciale apparecchio di misura.

E qui converrà dire qualche cosa del metodo di analisi idrostatica. Questo metodo ha lo scopo di determinare le deformazioni geometriche degli involucri nei loro modelli. Esso è un corollario del principio generale di similitudine meccanica, con certe restrizioni, e perciò la sua applicazione non è che approssimativa.

Supponiamo infatti di trascurare nello studio della forma di un pallone il peso della stoffa, per modo che le deformazioni geometriche dell'involucro non si riferiscono che alle pressioni dei fluidi in presenza.

Sia p_e la pressione del fluido esterno di densità π_e e p_i la pressione del fluido interno di densità π_i, nei dintorni d'un punto dell' involucro.

La forza per unità di superficie in questo punto sarà $p_i - p_e$; e se h è l'altezza del punto, a partire dal piano fittizio di livello, in cui si ha $p_i = p_e$, questa forza unitaria si potrà scrivere $(\pi_e - \pi_i)h$.

Supponiamo, per semplicità, un pallone cilindrico indefinito; si avrà allora per il punto considerato, su una sezione normale al cilindro, la relazione

$$\rho\,(\pi_e - \pi_i)\,h = T,$$

dove ρ è il raggio di curvatura in questo punto e T la tensione.

Per un modello di proporzioni ridotte nel rapporto λ, si avrà:

$$\rho'\,(\pi'_e - \pi'_i)\,h' = T'.$$

Se si vuole che $\frac{\rho}{\rho'} = \lambda$, si deve avere

$$\lambda = \frac{T}{T'} \cdot \frac{(\pi'_e - \pi'_i)\,h'}{(\pi_e - \pi_i)\,h};$$

ma

$$\frac{h'}{h} = \frac{1}{\lambda},$$

e dunque:

$$\lambda^2 = \frac{T'}{T} \cdot \frac{\pi'_e - \pi'_i}{\pi_e - \pi_i}.$$

Frattanto, se l'estensione elastica delle stoffe deve essere parimenti in proporzione di similitudine, e se si impiega sul modello una stoffa identica a quella del pallone si deve avere parimenti

$$T = T',$$

e per conseguenza

$$\frac{\pi'_e - \pi'_i}{\pi_e - \pi_i} = \lambda^2.$$

Se si immerge il modello nell'acqua, e si gonfia ad aria, si ha approssimativamente

$$\lambda = 30$$

come rapporto di similitudine. Si potrebbe ugualmente immergere il modello nell'aria, e gonfiarlo ad acqua.

Per le esperienze allo stato di riposo si utilizza una vasca di 2 metri di lunghezza e di 1 metro di larghezza e di profondità, le cui pareti di vetro assai trasparenti permettono di seguire distintamente i fenomeni da studiare.

Si riempie la vasca d'acqua, e si fa scendere il modello per mezzo di un verricello a catena. Il modello è collegato da una parte con un compressore d'aria e dall'altra parte con un manometro.

La stoffa impiegata nella costruzione del piccolo pallone è identica a quella del dirigibile reale.

Si applicano al modello i diversi tipi di sospensione della navicella, dei piani stabilizzatori e dei timoni, il cui peso deforma l'involucro. Si possono così prevedere, in un modo sicuro, le deformazioni corrispondenti dell'areostato reale e rimediarvi, sia facendo variare la pressione interna, sia ripartendo altrimenti i carichi, sia ancora modificando i punti di attacco.

Le esperienze alla vasca statica sono assai fastidiose dovendosi immergere nell'acqua gli istrumenti di misura. Si è allora invertita la disposizione dei fluidi, lasciando il modello nell'aria e riempiendolo d'acqua. In questo caso risulta naturalmente invertito anche il senso delle forze.

Per quanto ci consta, tali metodi sperimentali non vennero mai impiegati nella costruzione di altro dirigibile. E la concordanza dei risultati di tali metodi coi risultati effettivamente ottenuti coi due palloni costruiti in scala naturale, fanno ritenere ottimo e razionale il sistema usato dalla Brigata Specialisti.

§ 27. — *Dirigibile militare italiano: descrizione.* — Il dirigibile militare N. 1, i cui esperimenti furono fatti in ottobre del 1908, fu costruito su progetto dei capitani *Crocco* e *Ricaldoni* della Brigata Specialisti.

Il suo volume fu di 2700 metri cubi. Il diametro della sezione maestra 10 metri; la lunghezza totale 63 metri. Allungamento 6,3.

La potenza del motore era di 100 cavalli. Il diametro delle eliche era di 3 metri, esse ruotavano a 600 giri al minuto. La velocità propria risultò di 45 Km. all'ora. La lunghezza della navicella 7 od 8 metri.

La parte inferiore del pallone era tenuta rigida da una piatta-

forma, formata di tubi di acciaio, sagomata secondo la curvatura dell'involucro e ricoperta di stoffa per evitare ogni resistenza nociva.

A questa piattaforma erano attaccate:

1° La navicella per mezzo di apposita sospensione costituita da funi di acciaio;

2° Una chiglia portante alle sue estremità il timone verticale;

3° Dei piani d'impennaggio orizzontali e verticali collocati verso la parte posteriore.

Le eliche sono collocate al disopra della navicella all'estremità di due bracci di traliccio disposti a V. Esse sono a braccia articolate e a passo variabile: si può così da una parte evitare ogni sforzo di flessione sulle pale dell'elica, mentre dall'altra parte si può cambiare l'angolo d'attacco durante il viaggio e assegnargli il valore capace di dare il rendimento massimo corrispondente ad una data velocità di rotazione.

È parimenti possibile di eseguire la marcia indietro, invertendo il passo, ciò ch'è sopratutto utile in caso di manovre di partenza e di atterraggio.

La stabilità sulla verticale è ottenuta per mezzo di una inclinazione variabile dei piani d'impennaggio orizzontali collocati nella parte posteriore del pallone.

Durante l'ottobre si fecero tutti gli esperimenti per accertarsi del buon funzionamento dei timoni, dei piani. Particolarmente notevole è il fatto, che quasi tutte le manovre furono eseguite con pochissimo o quasi nullo consumo di zavorra, riuscendo ad utilizzare le reazioni dinamiche della resistenza dell'aria.

Eseguiti questi esperimenti, allo scopo di aumentare il volume, di introdurvi notevoli perfezionamenti, di utilizzare buona parte del materiale costituente il dirigibile stesso, questo venne smontato, e nel novembre, si iniziò subito la costruzione del dirigibile N. 1 bis (fig. 57).

L'involucro è stato portato da 2700 a 3450 metri cubi, arrotondando la poppa.

L'armatura interna è snodata anzichè continua e i nodi sono stati alquanto ravvicinati rispetto al numero 1. Inoltre gli archi trasversali sono stati sostenuti da puntoni rettilinei, e la sezione maestra del pallone non è più di rivoluzione, ma ha una generatrice in-

feriore rettilinea. In tal modo la carena è sviluppabile e può adattarsi a pallone sgonfio, su qualunque terreno accidentato.

L'1-bis è diviso in sette compartimenti stagni, ciascuno dei quali ha il proprio ballonnet. In tale modo un doloroso incidente, come quello capitato recentemente al dirigibile francese *République,* ossia la rottura dell'involucro, in seguito alla proiezione di una pala d'elica, non avrebbe prodotto nel nostro una simile catastrofe, giacchè la diminuita forza ascensionale prodotta dal vuotarsi del compartimento colpito avrebbe fatto discendere lentamente il dirigibile stesso (se pure il getto di un peso di zavorra, corrispondente alla perduta forza ascensionale, non fosse stato sufficiente a mantenere l'equilibrio).

I piani di stabilità sono sempre formati da timoni automatici che costituiscono una caratteristica del tipo italiano; ma nel N. 1 bis essi sono stati leggermente ridotti di superficie, e semplificati.

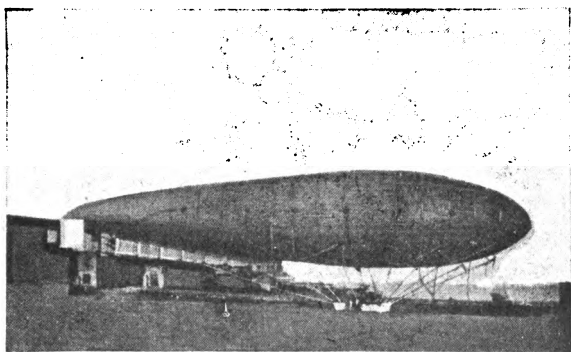



Fig. 57.

La chiglia che trasmette al pallone l'azione raddrizzante dei piani, è stata tenuta più robusta.

La navicella, il motore e le eliche sono rimaste intatte. Le valvole di sicurezza sono di un nuovo sistema automatico.

Il 17 agosto (1909) il dirigibile ha eseguito la sua prima uscita della durata di mezz'ora con cinque persone a bordo, 400 Kg. di zavorra e 200 Kg. di benzina e lubrificanti.

Gli esperimenti finora fatti hanno avuto lo scopo di determinare molti dati. Per esempio la velocità, in circuito chiuso e prestabilito,

fu di 53 Km. all'ora; si navigò inoltre a più di mille metri di altezza. Notevole è lo scarsissimo consumo di zavorra impiegato in tutte le escursioni.

Il motore è un Clement Bayard capace di sviluppare da 120 a 130 cavalli. Probabilmente si eseguirà una prova a tutta forza, quando tutti gli organi del dirigibile saranno stati dalla pratica definitivamente collaudati. Si otterrà allora una velocità superiore a quella di 53 Km. accennata, che richiese solo dal motore una potenza di 94 cavalli.

Il colonnello Moris e gli altri ufficiali sono rimasti soddisfatti delle qualità nautiche del nuovo dirigibile, della sua stabilità e della grande facilità di manovre e di ormeggio in campagna.

Coll'armatura snodata adottata nel N. 1 bis, il dirigibile militare italiano ha dimostrato di possedere tutti i vantaggi dei dirigibili completamente rigidi, senza perdere nessuno dei vantaggi dei semirigidi.

Date le sue doti di velocità e la possibilità di navigare oltre i mille metri, il dirigibile militare italiano viene ad essere classificato tra i primi di tutti gli Stati. Resta a determinarsi la sua capacità nei lunghi viaggi, che, date le sue qualità intrinseche, non può essere dubbia; a tale scopo saranno fra breve costruiti porti aerei e organizzati servizi di rifornimento, come hanno la Germania e la Francia, i quali mezzi sono assolutamente indispensabi, ed hanno permesso a tali Nazioni, specialmente alla prima, di eseguire lunghi percorsi.

Il nostro dirigibile, dedotto da severi metodi sperimentali, con nuovi dispositivi negli organi stabilizzatori e di governo, perviene a soluzioni molto semplici per la perfetta stabilità dinamica del sistema; inoltre la sua forma di minima resistenza lo fa classificare come il più veloce.

I risultati sono un meritato coronamento dell'indirizzo scientifico e tecnico dato dal Comandante Col. Moris agli studi di areonautica che si eseguono presso la Brigata Specialisti.

INDICE